

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
 Направление подготовки 12.04.01 Приборостроение
 Отделение школы Отделение контроля и диагностики

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ


Тема работы
Исследование артефактов немонотонности и рассеяния в компьютерной томографии неоднородных объектов с осевой симметрией

УДК 620.179.152.1:004

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ92	Мирзоев Хусниддин Джамоулудинович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник РКНЛ РКД	Осипов С.П.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН	Гасанов М.А.	д.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ТПУ	Федорчук Ю.М.	д.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП 12.04.01 Приборостроение	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД	Вавилова Г.В.	к.т.н.		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности

Направление подготовки 12.04.01 Приборостроение

Отделение школы Отделение контроля и диагностики

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

_____ Г.В. Вавилова

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме: магистерской диссертации

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ92	Мирзоев Хусниддин Джамолуддинович

Тема работы:

Исследование артефактов немонотонности и рассеяния в компьютерной томографии неоднородных объектов с осевой симметрией
Утверждена приказом директора (дата, номер)


Срок сдачи студентом выполненной работы:	25.05.2021
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Рентгеновский микротомограф "Орел-МТ"
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Разработать математическую модель имитации артефактов немонотонности и рассеяния в компьютерной томографии неоднородных объектов с осевой симметрией. 2. Разработать соответствующий модели алгоритм имитационного моделирования артефактов. 3. Реализовать полученный алгоритм имитационного моделирования в виде программы в системе MathCad. 4. Провести серию вычислительных экспериментов по оценке артефактов немонотонности и рассеяния в компьютерной томографии неоднородных объектов с осевой симметрией. 5. Оценить качество математической модели, алгоритма и реализующей их программа для оценки артефактов немонотонности и рассеяния.
Перечень графического материала	Рисунки и графики, презентация
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Гасанов Магеррам Али оглы, профессор ОСПН, д.э.н.

«Социальная ответственность»	Федорчук Юрий Митрофанович, профессор ООТД, д.т.н.
«Иностранный язык»	Федорина Зоя Владимировна, доцент ОИЯ, к.п.н.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
1 Обзор литературы, выбор цели диссертационных исследований и постановка задач	
Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	05.10.2019

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник РКНЛ РКД	Осипов С.П.	к.т.н.		05.10.2019

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ92	Мирзоев Хусниддин Джамолуддинович		05.10.2019

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
 Направление подготовки 12.04.01 Приборостроение
 Отделение школы Отделение контроля и диагностики
 Период выполнения 2019/2020 — 2020/2021 учебные года

Форма представления работы:

магистерская диссертация


(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	25.05.2021
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
31.12.2019	Знакомство с литературой по теме	10
30.05.2020	Разработка математической модели и алгоритма имитации артефактов немоноэнергетичности и рассеяния в компьютерной томографии неоднородных объектов с осевой симметрией.	20
15.03.2021	Разработка и отладка программы имитации артефактов немоноэнергетичности и рассеяния в компьютерной томографии неоднородных объектов с осевой симметрией	20
15.04.2021	Проведение вычислительных и натурных экспериментов по оценке артефактов немоноэнергетичности и рассеяния в компьютерной томографии неоднородных объектов с осевой симметрией	
14.05.2021	Анализ полученных результатов и выводы о достижении цели в основном разделе ВКР	5
14.05.2021	Разработка разделов «Социальная ответственность», «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение», "Иностранный язык"	10
25.05.2021	Оформление ВКР и презентационных материалов	10

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник РКНЛ РКД	Осипов С.П.	к.т.н.		20.10.19

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП 12.04.01 «Приборостроение»	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД	Вавилова Г.В.	к.т.н.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ92	Мирзоеву Хусниддину Джамолуддиновичу

Школа	ИШНКБ	Отделение школы	ОКД
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Приборостроение

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость выполняемых работ, материальных ресурсов, согласно применяемой техники и технологии, в соответствии с рыночными ценами. Оклады в соответствии с окладами сотрудников «НИ ТПУ»
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	— районный коэффициент — 1,3; — накладные расходы — 16%; — норма амортизации — 10%.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	В соответствии с налоговым кодексом Российской Федерации. Отчисления во внебюджетные фонды — 30,2 %

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения исследования	Анализ конкурентных технических решений, оценка готовности проекта к коммерциализации
2. Планирование и формирование бюджета исследования	Планирование этапов работы, определение календарного графика и трудоемкости работы, составление сметы затрат
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Расчет сравнительной эффективности проекта

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Диаграмма Ганта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	20.03.21
--	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН	Гасанов Магеррам Али оглы	д.э.н		20.03.21

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ92	Мирзоев Хусниддин Джамолуддинович		20.03.21

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ92	Мирзоев Хусниддин Джамолуддинович

Школа	ИШНКБ	Отделение школы (НОЦ)	ОКД
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	12.04.01 «Приборостроение»

Тема диссертации: «Исследование артефактов немоноэнергетичности и рассеяния в компьютерной томографии неоднородных объектов с осевой симметрией»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является лаборатория ООО «НПО Редвилл», где производилось исследование методов и приборов для измерения эксцентricности. Она оборудована письменным столом, персональными компьютерами и электронной аппаратурой.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов: <ul style="list-style-type: none"> • Природа воздействия; • Действие на организм человека; • Нормы воздействия и нормативные документы (для вредных факторов); • СЗ коллективные и индивидуальные. 1.2. Анализ выявленных опасных факторов: <ul style="list-style-type: none"> • Электробезопасность; • Пожаробезопасность. 	Вредные факторы: <ul style="list-style-type: none"> • Недостаточная освещенность; • Нарушения микроклимата, оптимальные и допустимые параметры; • Шум, ПДУ, СКЗ, СИЗ; • Повышенный уровень электромагнитного излучения, ПДУ, СКЗ, СИЗ. Опасные факторы: <ul style="list-style-type: none"> • Электроопасность; класс электроопасности помещения, безопасные номиналы I, U, R_{заземления}, СКЗ, СИЗ; • провести расчет освещения рабочего места; представить рисунок размещения светильников на потолке с размерами в системе СИ; Пожароопасность, категория пожароопасности помещения, марки огнетушителей, их назначение и ограничение применения.
2. Экологическая безопасность: <ul style="list-style-type: none"> • Выбросы в окружающую среду; • Решения по обеспечению экологической безопасности. 	Наличие промышленных отходов (бумага-черновики, вторцвет- и чермет, пластмасса, перегоревшие люминесцентные лампы, оргтехника, обрезки монтажных проводов) и способы их утилизации.
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: <ul style="list-style-type: none"> • перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; • разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. 	Рассмотрены 2 ситуации ЧС: <ol style="list-style-type: none"> 1) природная – сильные морозы зимой, (аварии на электро-, тепло-коммуникациях, водоканале, транспорте); 2) техногенная – несанкционированное проникновение посторонних на рабочее место (возможны проявления вандализма, диверсии, промышленного шпионажа), представлены мероприятия по обеспечению устойчивой работы организации.

4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	ГОСТы, СанПиНы, СНиПы.
--	------------------------

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	25.03.21
--	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ООТД	Федорчук Ю.М.	д.т.н.		25.03.21

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ92	Мирзоев Хусниддин Джамолуддинович		25.03.21

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен представлять современную научную картину мира, выявлять естественнонаучную сущность проблемы, формулировать задачи, определять пути их решения и оценивать эффективность выбора и методов правовой защиты результатов интеллектуальной деятельности с учетом специфики научных исследований для создания разнообразных методик, аппаратуры и технологий производства в приборостроении
ОПК(У)-2	Способен организовать проведение научного исследования и разработку, представлять и аргументированно защищать полученные результаты интеллектуальной деятельности, связанные с обработкой, передачей и измерением сигналов различной физической природы в приборостроении
ОПК(У)-3	Способен приобретать и использовать новые знания в своей предметной области на основе информационных систем и технологий, предлагать новые идеи и подходы к решению инженерных задач
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен осуществлять контроль качества на всех этапах жизненного цикла изделия применением приборов и систем измерения и контроля
ПК(У)-2	Способен к разработке, оптимизации и реализации программ модельных и натурных испытаний продукции и технологических процессов производства с применением приборов и систем измерения и контроля
ПК(У)-3	Способен к разработке и реализации математических алгоритмов обработки измерительной информации при проектировании приборов и систем на база современных программируемых компонентов
ПК(У)-4	Способен к разработке технической и нормативной документации при изготовлении и эксплуатации приборы и системы измерения и контроля.
ПК(У)-5	Способен к разработке функциональных и структурных схем приборов и систем измерения и контроля
ПК(У)-6	Способен к проектированию и конструированию элементов, узлов приборов и систем измерения и контроля, в том числе, с использованием средств компьютерного проектирования.
ПК(У)-7	Способен к построению математических моделей объектов исследования и выбору численного метода их моделирования,
ПК(У)-8	Способен к выбору оптимального метода, разработке программ экспериментальных исследований и их реализации
ПК(У)-9	Способен проектировать и организовывать учебный процесс по образовательным программам с использованием современных образовательных технологий

Реферат

Выпускная квалификационная работа состоит из 113 страниц, 16 рисунков, 15 таблиц, 117 источников, одного приложения, одной презентации.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, характеристическое излучение, максимальная энергия излучения, рентгеновский аппарат, бетатрон, артефакты, компьютерная томография, немонотонность излучения, рассеяние.

Объект исследования — артефакты немонотонности и рассеяния в рентгеновской компьютерной томографии.

Предмет исследования — методы и алгоритмы оценки артефактов в рентгеновской компьютерной томографии.

Цель работы — адаптировать математическую модель, алгоритм и программу в системе MathCad для имитационного моделирования артефактов немонотонности и рассеяния в компьютерной томографии неоднородных объектов с осевой симметрией и провести ряд вычислительных экспериментов.

Степень внедрения: результаты исследований реализованы в виде математической модели, алгоритма и программы формирования синограмм в компьютерной томографии для немонотонного излучения с учётом рассеяния первичных потоков в объекте контроля, а также модели, алгоритма и программы реконструкции изображений сечений. Модель учитывает вариации параметров системы компьютерной томографии. Проведено сопоставление результатов вычислительных и натурных экспериментов, оценено качество имитационного моделирования артефактов немонотонности и рассеяния цилиндрических неоднородных объектов с осевой симметрией.

Область применения: радиационные методы неразрушающих испытаний, контроля и диагностики объектов.

Экономическая эффективность и практическая значимость работы заключается в использовании полученных результатов для научного обоснования возможности проектирования систем рентгеновской компьютерной томографии с заданным уровнем качества.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений и обозначений	12
Сокращения	12
Обозначения	13
Нормативные документы	14
Введение	17
Актуальность темы	17
1 Обзор литературы, выбор цели диссертационных исследований и постановка задач	23
1.1 Обзор литературы	23
1.1.1 Рентгеновская компьютерная томография: исторические вехи и имена	23
1.1.2 Артефакты в рентгеновской компьютерной томографии: краткий обзор литературы	27
1.1.3 Методы исследования артефактов в рентгеновской компьютерной томографии	30
1.2 Объекты контроля	31
1.3 Цель диссертационных исследований и задачи её реализующие	33
2 Адаптация математической модели формирования синограмм применительно к объектам с осевой симметрией.....	35
2.1 Схема формирования проекций в рентгеновской компьютерной томографии в геометрии параллельного пучка излучения	35
2.2 Исходные параметры виртуальной системы РКТ	37
2.2.1 Характеристики источника рентгеновского излучения.....	37
2.2.2 Характеристики детектора рентгеновского излучения	38
2.2.3 Параметры поворотного стола.....	38
2.3 Адаптация модели формирования синограмм в РКТ	39
2.3.1 Модель формирования «идеальной» синограммы.....	39
2.3.2 Связь «идеальной» синограммы и синограммы для рентгеновского излучения	40
2.3.3 Адаптация модели формирования с учётом трансформации энергетического спектра источника рентгеновского излучения	41
3 Алгоритмы обработки синограмм в рентгеновской компьютерной томографии.....	43
3.1 Реконструкция с помощью обратного преобразования Радона.....	43
3.1.1 Прямое преобразование Радона	43
3.1.2 Обратное преобразование Радона.....	43
3.2 Реконструкция методом обратной проекции с фильтрацией.....	44
3.2.1 Фильтрация исходной синограммы.....	44
3.2.2 Обратная свёртка.....	44
3.2.3 Наличие артефакта и его мера	44
3.3 Оценка радиального распределения ЛКО с помощью обратного преобразования Абеля	45
3.3.1 Прямое преобразование Абеля	45
3.3.2 Обратное распределение Абеля.....	46
3.3.3 Наличие артефакта и его мера в РКТ осесимметричных объектов	46
4 Алгоритм (программа) для имитационного моделирования артефактов в РКТ применительно к осесимметричным объектам	47
4.1 Программа формирования проекций в РКТ с учётом ужесточения пучка излучения и рассеяния на примере многослойного шара	47
4.1.1 Блок формирования данных по ослаблению гамма-излучения	48
4.1.2 Блок ввода данных по ослаблению фотонного излучения	49
4.1.3 Зависимость МКО z-ого элемента, ЛКО материала детектора от энергии x , зависимость эффективности регистрации от энергии x и толщины детектора h_d	49
4.1.4 Трансформация энергетического спектра рентгеновского излучения.....	50
4.1.5 Подпрограмма-функция для вычисления толщины объекта контроля в д.с.п. для энергии x	50
4.1.6 Поток фотонов за ОК	50
4.1.7 Вычисление толщины объекта по лучу с координатами (x,y)	51
4.2 Алгоритм (программа) реконструкции изображений сечений на основе обратного преобразования Абеля	53

5 Моделирование артефактов в РКТ на примере многослойного шара	57
5.1 Моделирование и обработка синограмм для гамма-излучения.....	57
5.2 Оценка артефактов рассеяния в РКТ для моноэнергетического гамма-излучения	62
5.3 Моделирование артефактов ужесточения пучка в РКТ	63
5.3.1 Энергетический спектр без учёта характеристического излучения.....	63
5.3.2 Энергетический спектр с учётом характеристического излучения	66
6 Валидация имитационной модели оценки артефактов ужесточения пучка и рассеяния в компьютерной томографии.....	67
6.1 Сравнение модельных и экспериментальных оценок артефакта ужесточения пучка	67
6.2 Сравнение модельных и экспериментальных оценок артефакта рассеяния	69
Заключение	71
7 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	72
7.1 Оценка делового потенциала и перспектив для исследований с точки зрения ресурсоэффективности	72
7.2 План исследования	73
7.2.1 Структура работы.....	73
7.2.2 Определить сложность работы	74
7.2.3 Установить график научных исследований.....	74
7.3 Исследования и разработки бюджета.....	76
7.3.1 Расчет стоимости материала НТИ	76
7.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	77
7.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы	78
7.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые пожертвования).....	80
7.3.5 Бюджетный исследовательский проект	81
7.4 Определение ресурсов (экономия ресурсов), финансов, бюджета, социального и экономического равенства	81
8. Социальная ответственность	84
8.1 Производственная безопасность	84
8.2 Отклонение показателей микроклимата в помещении	84
8.3 Превышение уровней шума	85
8.4 Повышенный уровень электромагнитных излучений	87
8.5 Поражение электрическим током	89
8.6 Недостаточная освещённость рабочей зоны.....	90
8.7 Пожарная опасность	95
8.8 Экологическая безопасность	96
8.9 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	98
8.10 Перечень нормативно-технической документации.....	99
Список публикаций студента.....	100
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	101
Приложение А.....	114
Literature review, selection of the goal of research and problem statement.....	114
1 Literature review, selection of the goal of dissertation research and problem statement.....	115
1.1 Literature review	115
1.1.1 X-ray computed tomography: historical milestones and names	115
1.1.2 Artefacts in X-ray computed tomography: a brief review of literature	119
1.1.3 Methods of studying artefacts in X-ray computed tomography.....	121
1.2 Objects of control.....	122
1.3 The goal and objectives of the dissertation	122
2 Adaptation of the mathematical model of synogram formation to objects with axial symmetry	123
2.1 A scheme of projection formation in X-ray computed tomography in the geometry of a parallel radiation beam	124
REFERENCES	124

Список сокращений и обозначений

Сокращения

ОК — объект контроля

РИ — рентгеновское излучение

ИРИ — источник рентгеновского излучения

ДРИ — детектор рентгеновского излучения

ЛДРИ – линейный детектор рентгеновского излучения

ПДРИ – панельный детектор рентгеновского излучения

СД – сцинтилляционный детектор

ППД – полупроводниковый детектор

РКТ – рентгеновская компьютерная томография

ХИ – характеристическое излучение

СВ – случайная величина

АС – аналоговый сигнал

ЦС – цифровой сигнал

ЛРТИ – линейный РТИ

РОП – радиационно-оптический преобразователь

АЦП — аналого-цифровой преобразователь

ФП — фотопреобразователь

ПФ – промежуточный фильтр

КД – комбинированный детектор

ДПП – детектор прямого преобразования

ОФ – ослабляющий фильтр

ЛКО – линейный коэффициент ослабления излучения

МКО — массовый коэффициент ослабления излучения

ПК — персональный компьютер

ЧС — чрезвычайная ситуация

НРБ – нормы радиационной безопасности

Обозначения

I – интенсивность рентгеновского излучения

N – поток рентгеновского излучения

E — энергия фотонного излучения

h_d – толщина детектора (РОП или ППД)

Z_d – эффективный атомный номер материала (РОП или ППД)

ρ_d – плотность материала (РОП или ППД)

$E_{ab}(E, h_d)$ — средняя энергия, переданная зарегистрированным фотоном
РОП или ППД

E_{\max} — максимальная энергия рентгеновского излучения

$f_N(E, E_{\max})$ – числовой энергетический спектр

$f_I(E, E_{\max})$ – распределение интенсивности рентгеновского излучения по
энергии

$\mu(E)$ — линейный коэффициент ослабления гамма-излучения

$m(E)$ — массовый коэффициент ослабления гамма-излучения

Z — эффективный атомный номер материала

ρ — плотность материала

$\text{int}(x)$ — целая часть числа x

$\varepsilon(E)$ — эффективность регистрации фотонов с энергией E

$F(x)$ – расстояние от излучающей точки для точки детектирования с
координатой x (фокусное расстояние)

h_f – толщина промежуточного фильтра

Z_f – эффективный атомный номер материала ПФ

ρ_f – плотность материала ПФ

P – синограмма

P_θ – проекция под углом θ

Нормативные документы

1. ГОСТ 17038.—79. Детекторы ионизирующих излучений сцинтилляционные. Метод измерения спектрометрической постоянной фотоэлектронного умножителя, используемого для определения сцинтилляционных параметров детекторов.

2. ГОСТ 20426-82 Контроль неразрушающий. Методы дефектоскопии радиационные. Область применения.

3. СанПиН 2.6.1.3488-17. Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при обращении с лучевыми досмотровыми установками.

4. Приказ ФТС России от 21.12.2010 N 2509 (ред. от 15.05.2014) Об утверждении перечня и порядка применения технических средств таможенного контроля в таможенных органах Российской Федерации.

5. ГОСТ Р 56123-2014 Изделия медицинские электрические. Однофотонные эмиссионные компьютерные томографы. Технические требования для государственных закупок.

6. ГОСТ Р 55771-2013 Изделия медицинские электрические. Томографы рентгеновские компьютерные. Технические требования для государственных закупок.

7. ГОСТ Р МЭК 60601-2-28-2013 Изделия медицинские электрические. Часть 2-28. Частные требования безопасности с учетом основных функциональных характеристик медицинских диагностических рентгеновских излучателей

8. ГОСТ Р МЭК 60601-2-44-2013 Изделия медицинские электрические. Часть 2-44. Частные требования безопасности с учетом основных функциональных характеристик к рентгеновским компьютерным томографам.

9. ГОСТ Р МЭК 61223-2-6-2001. Государственный стандарт Российской Федерации. Оценка и контроль эксплуатационных параметров рентгеновской аппаратуры в отделениях (кабинетах) рентгенодиагностики. Часть 2-6.

Испытания на постоянство параметров. Аппараты для рентгеновской компьютерной томографии.

10. ГОСТ Р МЭК 61223-3-5-2008 Оценка и контроль эксплуатационных параметров в отделениях лучевой диагностики. Часть 3-5. Приемочные испытания. Оценка эксплуатационных характеристик рентгеновской аппаратуры для компьютерной томографии.

11. Standard Guide for Computed Tomography (CT) Imaging. E-1441. Philadelphia: ASTM, 2002.

12. Standard Guide for Computed Tomography (CT) System selection. E-1672. Philadelphia: ASTM, 1995.

13. Standard Practice for Computed Tomography (CT) Examination. E-1570. Philadelphia: ASTM, 1995.

14. Standard Practice for Computed Tomography (CT) Examination of Castings. E-1814: Philadelphia: ASTM, 2002.

15. EN 444:1994. Non-destructive testing. General principles for radiographic examination of metallic materials by X- and gamma rays. GEN, 1994.

16. ISO 10360—2:2009. Geometrical product specifications (GPS)—Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM). Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions.

17. EN 16016—1:2011. Nondestructive testing — Radiation methods—Computed tomography. Part 1: Terminology.

18. EN 16016—2:2011. Nondestructive testing — Radiation methods—Computed tomography. Part 2: Principle, equipment and samples.

19. EN 16016—3:2011. Nondestructive testing — Radiation methods—Computed tomography. Part 3: Operation and interpretation.

20. EN 16016—4:2011. Nondestructive testing — Radiation methods—Computed tomography. Part 4: Qualification.

21. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

22. СанПиН О. 2.2. 4.3359-16 Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах.
23. СанПиН 2.2.4.1191-03 Электромагнитные поля в производственных условиях.
24. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.
25. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы.
26. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
27. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
28. ГОСТ Р 56222-2014 Ресурсосбережение. Обращение с отходами.
29. ГОСТ Р 22.0.01-2016. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Основные положения.
30. СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009.

Введение

Актуальность темы

Рентгеновская компьютерная томография (КТ) после триумфального получения в 1979 Алланом Маклаудом Кормаком [1] и Годфри Ньюболдом Хаунсфилдом [2] Нобелевской премии по физиологии и медицине получила широкое распространение во всех отраслях науки и техники [3—8] (от медицины и биологии до материаловедения, неразрушающего и досмотрового контроля). Более точно назвать метод, открытый Кормаком и Хаунсфилдом, методом «трансмиссионной» рентгеновской вычислительной томографии. Определение «трансмиссионной» ассоциируется с переносом (ослаблением) фотонного излучения без изменения траектории движения первичных частиц.

Метод РКТ базируется на цифровой радиографии, являясь вершиной её развития. В классической реализации РКТ на основе сканирования объекта контроля (ОК) узким пучком рентгеновского излучения (РИ) под разными углами и оценки ослабления этого пучка формируется набор проекций, называемой синограммой. В результате обработки синограммы в томографии оценивается распределение некоторого информативного параметра по сечению ОК [9—11]. В зависимости от реализации метода РКТ информативным параметром является линейный коэффициент ослабления (ЛКО), число Хаунсфилда, плотность материала ОК или его (материала) эффективный атомный номер (ЭАН).

Классические системы РКТ состоят из [12] источника излучения, поворотного стола, многоканального детектора, устройства сбора и обработки информации. В качестве источников «рентгеновского» излучения (ИРИ) в РКТ выступают источники гамма-излучения, рентгеновские аппараты, синхротроны, бетатроны и т.п. Поворотные столы обеспечивают вращение ОК относительно некоторой оси, при этом измеряется ослабление фотонного пучка под различными ракурсами. Ослабленное объектом излучение регистрируется многоканальным детектором рентгеновского излучения (ДРИ). Широко используются линейные детекторы рентгеновского излучения (ЛДРИ) и

панельные детекторы рентгеновского излучения (ПДРИ). Изначально метод РКТ использовался для визуализации внутренней структуры испытуемого объекта. В последнее десятилетие явно прослеживается тенденция превращения метода РКТ из средства визуализации в высококачественное измерительное средство [13—16], предназначенное для линейных измерений, измерений площадей и объёмов, плотности и пористости и т.п. Именно этот фактор оказал особое влияние на возвращение интереса к исследованию артефактов в РКТ [12]. Напомним, что под артефактом в РКТ понимается смещение оценки распределения информативного параметра от его истинного распределения. Артефакты вызывают [12, 17] отклонения законов испускания, взаимодействия и регистрации фотонного излучения от некоторых идеализированных (физические причины) законов, например, модель плоскопараллельного моноэнергетического пучка с детектором полного поглощения, и невозможность обеспечения соответствия реальных технических условий формирования информации идеальной модели (технические причины). К наиболее значимым артефактам физической природы относятся: артефакт немонотонности, обусловленный отличием энергетического спектра ИРИ от δ -функции; артефакт рассеяния, вызванный наличием рассеянного в ОК излучения в потоке регистрируемых фотонов.

На **актуальность** исследований, связанных с оценкой артефактов немонотонности и рассеяния в рентгеновской компьютерной томографии, помимо факторов, отмеченных выше, влияет также потребность в расширении номенклатуры контролируемых объектов, в частности, неоднородных объектов с осевой симметрией

Сказанное выше подтверждает **актуальность** темы диссертационных исследований.

Необходимость в проведении исследований:

фундаментальный характер — исследования значимости немонотонности ИРИ и процесса рассеяния фотонов в ОК на качество

реконструируемых изображений в РКТ (точность оценки распределения информативного параметра по сечению ОК);

прикладной характер – выбор параметров систем РКТ, обоснование модификаций схем сканирования с целью уменьшения артефактов немонотонности и рассеяния.

Объекты исследования — артефакты немонотонности и рассеяния в рентгеновской компьютерной томографии.

Предмет исследования — методы и алгоритмы оценки артефактов в рентгеновской компьютерной томографии.

Целью работы является адаптация математической модели, алгоритма и программы в системе MathCad для имитационного моделирования артефактов немонотонности и рассеяния в компьютерной томографии неоднородных объектов с осевой симметрией и проведение ряда вычислительных экспериментов.

Для достижения сформулированной выше цели необходимо решить **ряд следующих задач:**

1. Для источника излучения с произвольным энергетическим спектром адаптировать математическую модель и алгоритм формирования синограмм применительно к объектам с осевой симметрией и реализовать их в программе на MathCad.

2. Модифицировать разработанную модель (программу) блоком описания спектра рентгеновского и гамма-излучения с учётом характеристического излучения и предварительной фильтрации.

3. Усовершенствовать модифицированную модель (программу) блоком оценки вклада рассеяния в интегральный поток регистрируемого излучения.

4. Адаптировать алгоритм реконструкции изображений сечений применительно к рассматриваемой задаче.

5. Сопоставить результаты вычислительных и натурных экспериментов с целью оценки качества функционирования алгоритма имитационного

моделирования артефактов немоноэнергетичности и рассеяния цилиндрических неоднородных объектов с осевой симметрией.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1. В разработке математической модели и алгоритм формирования синограмм применительно к объектам с осевой симметрией и реализации их в программе на MathCad для источника излучения с произвольным энергетическим спектром.

2. В модификации разработанной модели (программы) блоком описания спектра рентгеновского и (или) гамма-излучения с учётом характеристического излучения и предварительной фильтрации.

3. В совершенствовании модифицированной модели (программы) блоком оценки вклада рассеяния в интегральный поток регистрируемого излучения.

4. В адаптации алгоритма реконструкции изображений сечений применительно к рассматриваемой задаче.

5. В сопоставлении и анализе результатов вычислительных и натурных экспериментов с целью оценки качества функционирования алгоритма имитационного моделирования артефактов немоноэнергетичности и рассеяния цилиндрических неоднородных объектов с осевой симметрией.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов для научного обоснования возможности проектирования систем рентгеновской компьютерной томографии цилиндрических неоднородных объектов с осевой симметрией с учётом артефактов немоноэнергетичности и рассеяния, а также в учебном процессе при проведении занятий по математическому моделированию приборных систем и радиационным методам.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использованы: методы Монте-Карло; методы математического моделирования; методы переноса рентгеновского и гамма-излучения; методы обработки

экспериментальных данных; методы теории вероятностей и математической статистики.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель, алгоритм и программа формирования синограмм применительно к объектам с осевой симметрией для источника излучения с произвольным энергетическим спектром.

2. Модификация разработанной модели (программы) блоком описания спектра рентгеновского и (или) гамма-излучения с учётом характеристического излучения и предварительной фильтрации.

3. Модификация модели (программы) блоком оценки вклада рассеяния в интегральный поток регистрируемого излучения.

4. Адаптация алгоритма реконструкции изображений сечений применительно к рассматриваемой задаче.

5. Результаты анализа сопоставления вычислительных и натурных экспериментов с целью оценки качества функционирования алгоритма имитационного моделирования артефактов немоноэнергетичности и рассеяния цилиндрических неоднородных объектов с осевой симметрией.

Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов обеспечена корректным использованием интегрального исчисления, геометрических преобразований, теории переноса фотонного излучения, а также их согласованностью с результатами натурального эксперимента и литературными данными. В реализации предложенных алгоритмов имитационного моделирования артефактов немоноэнергетичности и рассеяния, а также в сопоставлении результатов численных и натурных экспериментов применялось лицензированное программное обеспечение и программы, разработанные сотрудниками Российско-китайской научной лаборатории радиационного контроля и досмотра.

Личный вклад автора заключается в создании алгоритма и программы для имитационного моделирования артефактов немоноэнергетичности и

рассеяния применительно к контролю цилиндрических неоднородных объектов с осевой симметрией методом рентгеновской компьютерной томографии.

Реализация результатов работы. Результаты проведённых исследований применяются для оценки артефактов немоноэнергетичности и рассеяния в рентгеновской компьютерной томографии с целью подтверждения или опровержения принципиальной возможности достижения задачи проектирования анализируемых систем, а также в качестве виртуальной лабораторной работы, посвящённой анализу артефактов в рентгеновской компьютерной томографии.

Апробация работы. Материалы, вошедшие в предлагаемую диссертацию, обсуждались на отчетах по НИР отделения контроля и диагностики ИШ НКБ в 2018 – 2021 годах и докладывались на международной конференции:

– V международная конференция «Инновации в неразрушающем контроле (SibTest 2019)», г. Екатеринбург, 26—28 июня 2019.

Публикации. По теме выпускной квалификационной работы опубликована 1 статья и одна интернет-публикация, принята к публикации статья в журнале Дефектоскопия.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы, включающего 117 источников. Объём диссертации составляет 113 страниц машинописного текста, 16 рисунков, 15 таблиц и 1 приложений.

1 Обзор литературы, выбор цели диссертационных исследований и постановка задач

1.1 Обзор литературы

1.1.1 Рентгеновская компьютерная томография: исторические вехи и имена

1917: Иоганн Радон, теорема об обращении проекций (прямое и обратное преобразование Радона). Для истории науки не редкость то, что теория, зачастую, существенным образом опережает практическое воплощение идеи, причём и теоретические исследования иногда повторяются далеко не в первичном виде. Не является исключением и РКТ. В 1917 году великий австрийский математик Иоганн Радон ввёл интегральное преобразование [18], впоследствии названное его именем. Достоинством этого преобразования является возможность его обращения. Статья [18] написана в классическом математическом виде — без иллюстраций и простых примеров, может быть именно поэтому преобразования Радона были вновь открыты спустя многие десятилетия, причём в несколько ином виде. Поясним в кратком виде идею Радона для плоскости. Пусть имеется некоторая область $S \subset \mathbb{R}^2$, и на S определена некоторая функция f , которая не равна нулю, по крайней мере, на части множества S . Рассмотрим совокупность всех интегралов P от функции f по всем лучам (прямым линиям), пересекающим область S . Представим совокупность P в виде объединения

$$P = \bigcup_{\theta \in [0, 2\pi]} P_{\theta}, \quad (1)$$

где P_{θ} — совокупность интегралов от функции f по параллельным лучам, соответствующим углу θ (см. рисунок 1).

На рисунке 1 приведена схема, поясняющая теорему Радона об интегралах по лучам (проекциях). Введём две декартовых системы координат: неподвижную — XOY ; подвижную — $X'OY'$. Точка O принадлежит S . Двумерную область S является ограниченным множеством, поэтому её можно

вписать в круг $\mathbf{R} \subset \mathfrak{R}^2$ радиусом R . На рисунке 1 красной линией отмечен луч $\mathbf{L}(\theta, x')$, проходящий через точку x' под углом θ . При формировании \mathbf{P}_θ — совокупности интегралов от функции f по параллельным лучам, соответствующим углу θ , луч перемещается в перпендикулярном направлении, обозначенном на рисунке 1 красной пунктирной стрелкой.

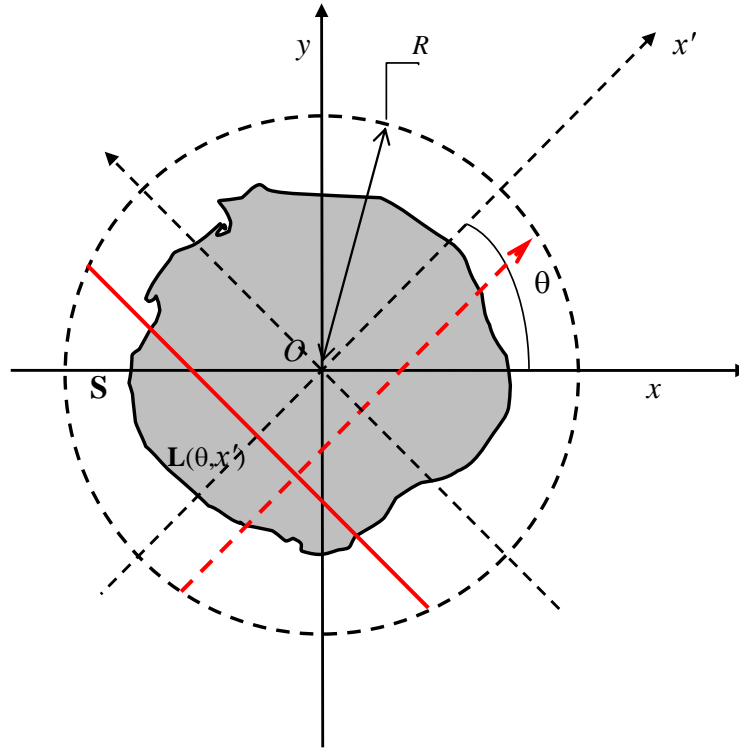


Рисунок 1 — Схема, поясняющая теорему Радона об интегралах по лучам (проекциях)

Взаимная связь систем координат XOY и $X'OY'$ описывается преобразованием поворота

$$\begin{cases} x' = x \cos \theta + y \sin \theta \\ y' = -x \sin \theta + y \cos \theta \end{cases}, \begin{cases} x = x' \cos \theta - y' \sin \theta \\ y = x' \sin \theta + y' \cos \theta \end{cases}. \quad (2)$$

Функция f доопределяется на весь круг \mathbf{R} следующим образом

$$\hat{f}(x, y) = \begin{cases} f(x, y), & (x, y) \in \mathbf{S} \\ 0, & (x, y) \in \mathbf{R} \setminus \mathbf{S} \end{cases}. \quad (3)$$

С формализованной точки зрения выражение для оценки совокупности интегралов по параллельным лучам \mathbf{P}_θ , $0 \leq \theta \leq 2\pi$, имеет вид

$$\mathbf{P}_\theta = \left\{ \int_{L(\theta, x')} \hat{f}(x', y') dy' \middle| -R \leq x' \leq R \right\}. \quad (4)$$

Радонотом была доказана теорема о реконструкции (восстановлении) функции $f(x,y)$ по полному набору интегралов \mathbf{P} . В дальнейшем отмеченный набор \mathbf{P} стал называться синограммой, а совокупности \mathbf{P}_θ — проекциями.

Отметим, что значимость заслуг Иоганна Радона перед математикой выразились в присвоении его имени в 2003 году Австрийской Академией наук вновь открывшемуся Институту вычислительной и прикладной математики.

1963—1964: Аллан Кормак — теоретическое обоснование метода РКТ. Физик и математик Кормак в своих двух главных работах [19, 20] привёл теоретическое обоснование рентгеновской компьютерной томографии. В качестве функции f рассматривался линейный коэффициент ослабления (ЛКО) гамма-излучения. В алгоритме реконструкции изображений сечений использовались прямое и обратное преобразования Фурье. Указанные выше работы не сразу привлекли внимание научного сообщества, это было связано с несовершенством техники и технологий, связанных с цифровым радиометрическим контролем.

1969—1971: Годфри Хаунсфилд – разработка первой системы РКТ. Инженер-электрик Хаунсфилд первым пришёл к практическому воплощению идей Кормака [21], разработав ЭМИ-сканер, который стал первым компьютерным рентгеновским томографом. Этот сканер был разработан только для сканирования головы. Научное сообщество и власти высоко оценили труд изобретателя. Шкала измерения плотности исследуемой среды для рентгеновских лучей в РКТ получила имя Хаунсфилда.

1979: Нобелевская премия за разработку КТ (А. Кормак, Г. Хаунсфилд). Метод РКТ предоставил возможность изучения внутренней структуры объекта исследований. Кормак и Хаунсфилд стали лауреатами Нобелевской премии по физиологии или медицине 1979 года «за разработку компьютерной томографии». В решении Нобелевского комитета было отмечено: «Когда метод был введен в медицинскую практику шесть лет назад, быстро стало очевидно, что это означало что-то революционно новое, с большими последствиями для рентгеновской диагностики и медицинских

дисциплин, которые используют ее». Эту фразу можно дополнить тем, что появление метода РКТ ознаменовало революцию не только в медицине, но и во всех отраслях науки и техники. Компьютерная томография применяется везде, где необходима информация о внутренней структуре ОК, то есть о распределении по объёму некоторого информативного параметра, представляющего интерес для потребителей.

1979—1981: Альберт Маковски, Роберт Альварес — разработка теоретических основ метода дуальных энергий (МДЭ). Отличие энергетических спектров рентгеновского излучения от δ -функций в РКТ обусловило появление искажений (артефактов) в реконструируемых изображениях, так как при увеличении толщины ослабляющего объекта происходит «ужесточение» рентгеновского излучения (артефакт немонотонности). Существует множество подходов к снижению влияния этого артефакта на качество реконструкции. Один из таких подходов привёл к появлению метода дуальных энергий [22], который помимо снижения влияния артефакта немонотонности на качество исследований методом РКТ привёл к повышению информативности РКТ. Комплексирование РКТ с МДЭ позволяет одновременно оценить пространственное распределение по объёму ОК не только плотности, но и эффективного атомного номера.

1990—1991: Вилли Календер, Петер Вок — совершенствование методов и систем спиральной КТ. Одна из самых значимых проблем РКТ связана с производительностью метода. Разработка методов и систем спиральной КТ привела к повышению производительности компьютерной томографии, что особенно важно для протяжённых объектов.

1990—1994: Мартц Гарри, Азеведо Стефан, Изуми Шигеру, Камата Шоужу, Штайнбок Лотар, Эдуард Вайнберг, Феликс Завьялкин¹ — системы КТ на основе линейных ускорителей и бетатронов. Изначально метод РКТ разрабатывался в медицине в качестве способа визуализации внутренней структуры пациентов, но получил и широкое распространение в

¹ НИИ ИН ТПУ — 40 лет // За кадры. 1 сентября 2008 №16 (3277)

науке, промышленности и досмотровом контроле. Рентгеновских аппаратов имеют максимальную энергию от 50 и до 450 кэВ (современные до 800 кэВ) оказалось недостаточно для контроля крупногабаритных изделий в нефтегазовой промышленности, атомной промышленности, машиностроении. Для повышения проникающей способности в качестве источника высокоэнергетического рентгеновского (тормозного) излучения стали применяться линейные ускорители и бетатроны [24—26].

2008: Йенс Шломка, Евальд Роэssl, Кристоф Херрманн, Роланд Прокса — разработка теоретических основ мульти-энергетической РКТ. Наиболее эффективным подходом к повышению информативности рентгеновской компьютерной томографии является применение её мульти-энергетической реализации [27]. Мульти-энергетическая реализация РКТ позволяет не только более точно оценивать распределения плотности и эффективного атомного номера по сечению (объёму) объекта контроля, но и повысить вероятность обнаружения химических элементов, а также повысить точность измерения концентрации и т.п.

1.1.2 Артефакты в рентгеновской компьютерной томографии: краткий обзор литературы

Вся история развития рентгеновской компьютерной томографии в различных её реализациях от средств визуализации внутренней структуры ОК до средств измерений разнообразных параметров объекта (плотности, пористости, концентрации) связана с исследованиями артефактов [12, 28—31], обусловленных физическими и техническими причинами (факторами), и совершенствованием технических и алгоритмических средств снижения уровней этих артефактов до значений (уровней), приемлемых для конечных потребителей [32—34]. Под артефактами понимаются искажения в итоговых изображениях сечений, получаемых методом РКТ, то есть отклонения оценок функции $f^*(x,y)$ от функции $f(x,y)$, заданной на множестве S (смотри выше рисунок 1 и пояснение преобразований Радона). Исследование артефактов представляет интерес не только в классической реализации РКТ, но и в

реализациях томографии, дополненных методом дуальных энергий [35—37], методом мульти-энергий (ММЭ) [38—41] и спектральной томографии [42—44]. Существенное влияние на смещение оценок распределений линейного коэффициента ослабления (ЛКО) рентгеновского излучения (первый этап развития РКТ — классическая реализация РКТ), распределений плотности ρ и эффективного атомного номера Z (реализации РКТ на основе МДЭ или ММЭ, спектральная реализация РКТ) по объёму объекта контроля (ОК) оказывает ряд физических и технических факторов. Среди физических факторов следует отметить: немонотонность источника рентгеновского (тормозного) излучения [45—50]; существенный вклад излучения, рассеянного в ОК, в интегральный поток регистрируемого излучения [50—54]; наличие фонового излучения [55, 56]; непрозрачность части ОК для используемого излучения — металлический артефакт [12, 17, 55, 57, 58]; послесвечение сцинтилляторов [59—62]; мёртвое время радиометрических детекторов [63—68], регистрирующих излучение в счётном и спектрометрическом режимах; уширение функции рассеяния точки (ФРТ) [69—71] в радиационно-оптических преобразователях (РОП) излучения, обусловленное рассеянием, оптическим и радиационным влиянием каналов друг на друга. Особое внимание физическим факторам при исследовании артефактов в РКТ уделяется потому, что они существуют как данность (объективная реальность) и не зависят от качества технических решений. Это означает, что даже для «идеальной» системы РКТ артефакты, обусловленные физикой взаимодействия рентгеновского излучения с веществом (испускание, «собственно взаимодействие» и регистрация), существуют и уменьшить их влияние на качество итоговых изображений можно специальными техническими, методическими и алгоритмическими приёмами, которые, как правило, усложняют схему системы РКТ и (или) функционирование системы. К техническим причинам артефактов в РКТ относят любое отклонение параметров крупных компонентов (составляющих) соответствующих систем от идеальных (модельных), например, неточное

позиционирование каналов в ДРИ, изменение шага по углу при вращении объекта относительно комплекса ИРИ + ДРИ и т.п.

На рисунке 2 приведён график распределения научных публикаций по годам для ключевых слов artifacts+СТ+X-ray. График сформирован на основе поиска с помощью базы SCOPUS² и соответствующих инструментов.

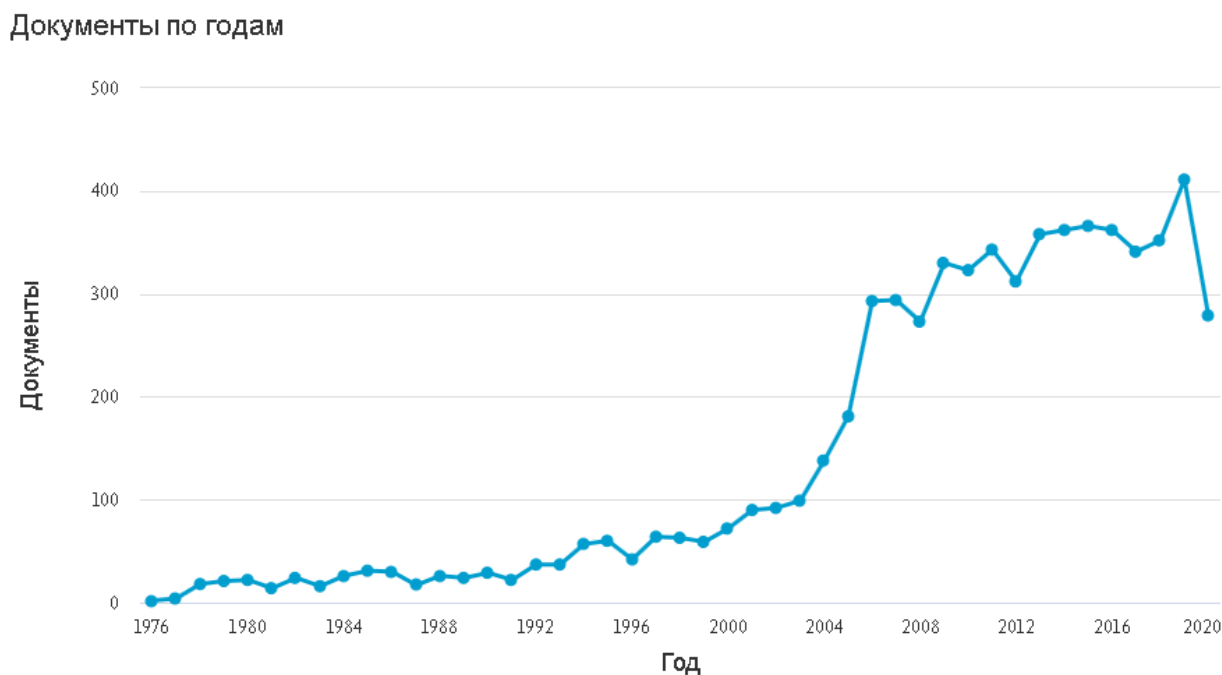


Рисунок 2 — Распределение научных публикаций по годам для ключевых слов artifacts+СТ+X-Ray

График, приведённый на рисунке 2, свидетельствует об устойчивости интереса к исследованиям, связанным с артефактами в РКТ

Среди всей совокупности физических артефактов РКТ особое место занимают артефакты немонотонности (эквивалентно — артефакт полихроматичности, артефакт ужесточения пучка рентгеновского (тормозного) излучения) и рассеяния. Причиной важности первого артефакта является природа рентгеновского (тормозного) излучения, у которого энергетический спектр существенно далёк от энергетического спектра монотонного излучения (δ -функции). Значимость же второго артефакта связана с естественным желанием потребителей получить от производителей системы РКТ с максимально возможной производительностью. Производительность

²SCOPUS. URL: <https://www.elsevier.com>

систем РКТ не в последнюю очередь зависит от типа ДРИ. Системы РКТ с панельными ДРИ обладают существенно лучшей производительностью по сравнению с ЛДРИ. Платой же за это для систем КТ с ИРИ с достаточно высокой максимальной энергией является повышение влияния эффекта рассеяния на качество реконструкции. Анализ распределения числа научных публикаций из базы SCOPUS по годам с ключевыми словами artifacts+X-ray+beam hardening+(computed tomography OR CT) продемонстрировал неослабевающий интерес к исследованиям артефакта немоноэнергетичности, в год публикуется от 30 до 40 работ. Аналогичен интерес исследователей и к артефакту рассеяния.

Ниже рассмотрим подходы к исследованию артефактов и методов их снижения в РКТ.

1.1.3 Методы исследования артефактов в рентгеновской компьютерной томографии

На начальном этапе развития методов рентгеновской компьютерной томографии артефакты исследовались в основном методом натурального эксперимента. Этот подход связан со значительными временными и материальными затратами, так как необходимы специальным образом изготовленные фантомы. Вариации же комплектующих систем РКТ в процессе экспериментальных исследований излишне затратны даже для крупных научных организаций и коллабораций. Особая сложность применения экспериментального подхода к исследованию того или иного физического артефакта в РКТ связана с трудностью вычленения влияния соответствующих процессов. Этот факт обуславливает необходимость в высококвалифицированных специалистах: математиках; материаловедах; физиках; электронщиках; инженерах-механиках; интерпретаторах результатов физических экспериментов.

Затратность натуральных экспериментов применительно к описанным выше исследованиям привела к полной или частичной замене реальных экспериментов виртуальными (синонимы — вычислительными, численными,

компьютерными, имитационными). Разумеется, что полностью исключить натурный эксперимент невозможно, он необходим для проверки математических (имитационных, численных) моделей, положенных в основу виртуальных систем РКТ. Виртуальные системы РКТ должны базироваться на глубоком понимании физических закономерностей формирования и обработки информации применительно к томографии.

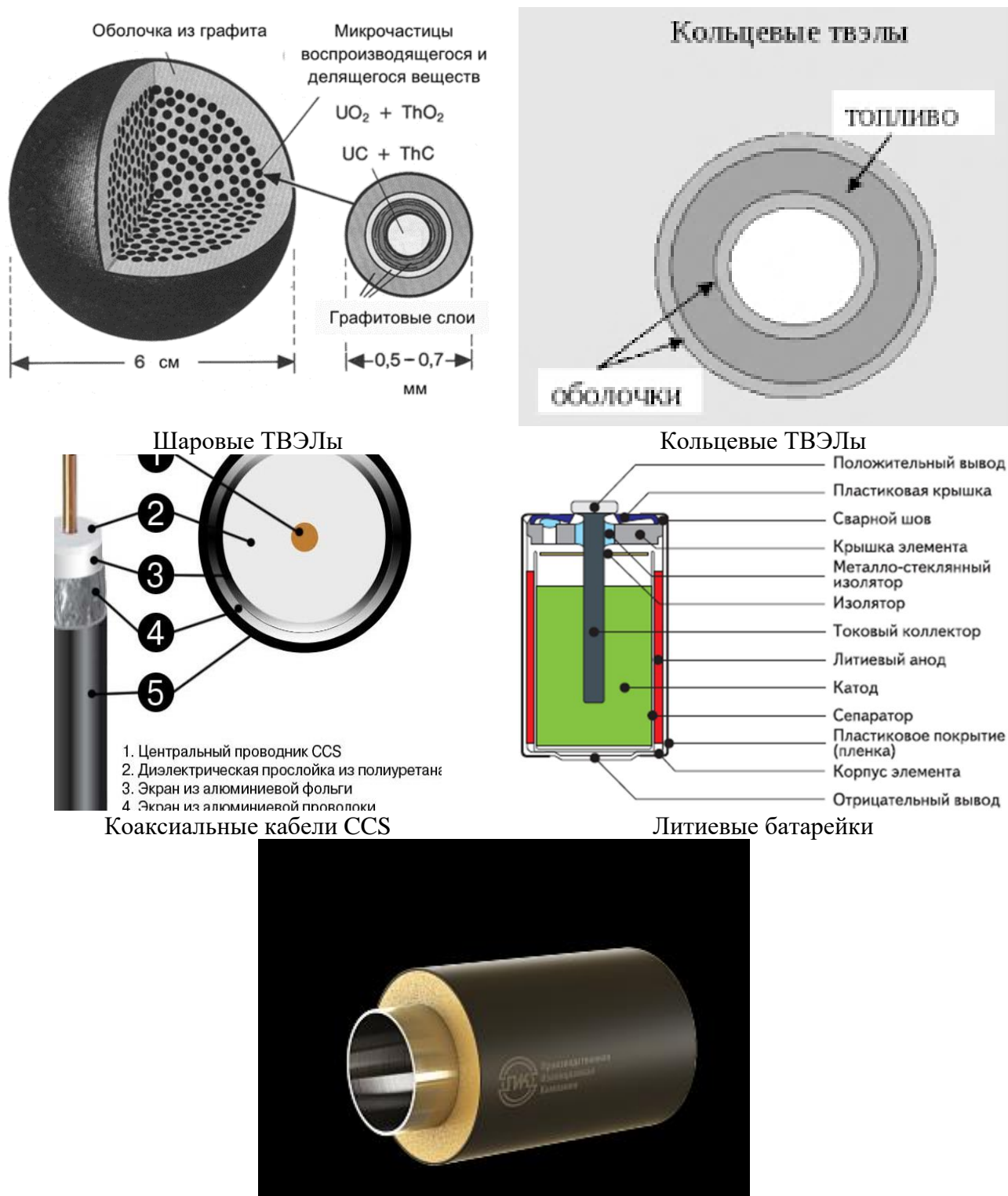
Подчеркнём, что на современном этапе развития методов рентгеновской компьютерной томографии превалирующим подходом к решению поставленных выше задач, актуальных на стадии проектирования РКТ, является подход [40, 72—77], основанный на математических и имитационных моделях соответствующих систем с дополнением блоками учёта физических и технических артефактов. Разумеется, что упомянутые выше модели должны быть реализованы в виде компьютерных программ.

1.2 Объекты контроля

Абсолютно невозможно исследовать влияние физических артефактов применительно не конкретному объекту или классу объектов ОК, а ко всем объектам. Наиболее эффективно многие виды артефактов оцениваются для цилиндрических однородных по материалу объектов [50, 56, 63]. Такие ОК относятся к более широкому классу объектов — классу объектов с осевой симметрией с возможной вариацией радиальных распределений по плотности ρ и (или) эффективному атомному номеру Z .

Существует ряд объектов контроля ответственного назначения, которые можно отнести к упомянутому выше классу объектов с осевой симметрией. Здесь под изделиями ответственного назначения понимаются технические изделия, отказ которых в процессе эксплуатации может привести к прекращению или нарушениям функционирования сложных комплексов и систем. Последствиями отказов являются нарушения экологической, промышленной, химической, радиационной безопасности, а устранение нарушений сопряжено со значительными временными и материальными

затратами. Упомянутые выше объекты могут иметь однородную и относительно неоднородную структуру. Примером таких ОК (см. рисунок 3) являются, например, шаровые и кольцевые тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ), коаксиальные кабели, стальные трубы в оболочках и без, цилиндрические аккумуляторы значительной энергоёмкости.



Стальные трубы в ППУ изоляции в защитной полиэтиленовой оболочке
Рисунок 3 — Примеры объектов с осевой симметрией

1.3 Цель диссертационных исследований и задачи её реализующие

В научной литературе не в полной мере рассмотрены вопросы, связанные с реализуемостью задач проектирования систем РКТ для контроля объектов из отмеченного выше класса и учитывающие основные артефакты, а также технические воздействия для их уменьшения. Напомним, что наиболее значимыми артефактами являются артефакты немоноэнергетичности (ужесточения) и рассеяния.

Для оценки возможности реализации задачи проектирования систем для контроля объектов с осевой симметрией необходимо разработать обобщённую математическую модель оценки артефактов в РКТ и реализовать её в виде программы в системе MathCad, которая будет представлять собой виртуальную систему рентгеновской компьютерной томографии (цифровой имитатор системы РКТ). Цифровой имитатор РКТ позволяет проводить вычислительные эксперименты по оценке артефактов немоноэнергетичности и рассеяния для рассматриваемых ОК. Для экспериментальной проверки оценок исследуемых артефактов, полученных методом вычислительного эксперимента, могут быть использованы результаты, имеющиеся в научной литературе, а также результаты экспериментов на микротомографе «Орёл» НИ ТПУ.

Из сказанного выше вытекает **цель выпускной квалификационной работы** — разработка математической модели, алгоритма и программы в системе MathCad для имитационного моделирования артефактов немоноэнергетичности и рассеяния в компьютерной томографии неоднородных объектов с осевой симметрией и проведение ряда, иллюстративных и сопоставительных вычислительных и натурных экспериментов.

Для достижения сформулированной выше цели необходимо решить **ряд следующих задач**:

1. Для источника излучения с произвольным энергетическим спектром адаптировать математическую модель и алгоритм формирования синограмм применительно к объектам с осевой симметрией и реализовать их в программе на MathCad.

2. Модифицировать разработанную модель (программу) блоком описания спектра рентгеновского и гамма-излучения с учётом характеристического излучения и предварительной фильтрации.

3. Усовершенствовать модифицированную модель (программу) блоком оценки вклада рассеяния в интегральный поток регистрируемого излучения.

4. Адаптировать алгоритм реконструкции изображений сечений применительно к рассматриваемой задаче.

5. Сопоставить результаты вычислительных и натурных экспериментов с целью оценки качества функционирования алгоритма имитационного моделирования артефактов немоноэнергетичности и рассеяния цилиндрических неоднородных объектов с осевой симметрией.

2 Адаптация математической модели формирования синограмм применительно к объектам с осевой симметрией

В последние годы было опубликовано значительное количество статей [78—83], посвящённых различным аспектам математического и численного моделирования изображений в цифровой радиографии и проекций в рентгеновской компьютерной томографии. В качестве основы для адаптации будем использовать математические модели из работ [82, 83] с учётом типа объектов контроля и общих подходов [84, 85]. Основная часть диссертационных исследований приведена в работе ³.

Математическая модель формирования синограмм (набора проекций) состоит из нескольких блоков, опишем их последовательно.

2.1 Схема формирования проекций в рентгеновской компьютерной томографии в геометрии параллельного пучка излучения

Геометрия параллельного пучка излучения применительно к оценке исследуемых артефактов была выбрана намеренно. Такая геометрия позволяет наиболее точно оценить артефакты, так как для неё (геометрии) отсутствуют искажения, вызванные веерностью (конусностью) пучка изображения.

Выше при описании понятия «артефакт в РКТ» подчёркнуто, что искажения определяются относительно некоторой идеализированной системы формирования «идеальной» синограмм. «Идеальная» синограмма формируется в геометрии точечного мононаправленного пучка моноэнергетического гамма-излучения. Энергетический спектр источника излучения $g(E)$ описывается в данном случае выражением

$$g(E) = \delta(E - E_0), \delta(E - E_0) = \begin{cases} \infty, & E = E_0 \\ 0, & E \neq E_0 \end{cases}, \int_0^{\infty} \delta(E) dE = 1, \quad (5)$$

где δ — обобщённая функция Дирака;

E_0 — энергия гамма-излучения.

³ Осипов С.П., Мирзоев Х.Д., Чахлов С.В., Осипов О.С. Имитационная модель оценки артефактов немонотонности и рассеяния в компьютерной томографии // Дефектоскопия. — 2021. (принята к печати)

Отметим, что в качестве функции $f(x, y)$, $(x, y) \in \mathbf{S}$, из теоремы Радона будет выступать распределение линейного коэффициента ослабления (ЛКО) излучения $\mu(E_0, x, y)$, $(x, y) \in \mathbf{S}$.

На рисунке 4 приведена схема формирования проекций в РКТ в геометрии параллельного пучка. Схема аналогична приведённой в [83] и базируется на схеме (рисунок 1), поясняющей теорему Радона об интегралах по лучам (проекциях).

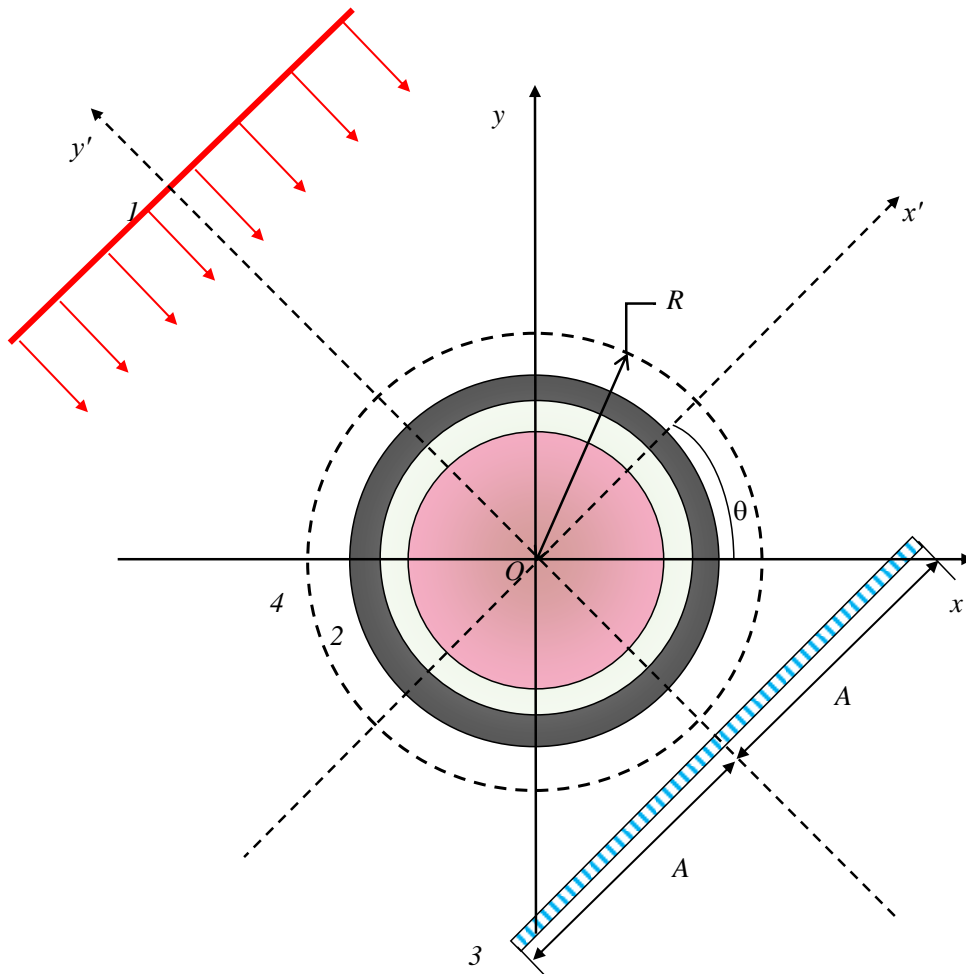


Рисунок 4. Схема формирования проекций в РКТ в геометрии параллельного пучка:
1 – ИРИ; 2 – ОК; 3 – линейный ДРИ; 4 – окружность, описывающая сечение ОК.

Для иллюстрации на рисунке 4 представлено изображение сечения трёхслойного объекта (шара, цилиндра, конуса и т.п.).

Формула (4) для оценки проекций \mathbf{P}_θ , $0 \leq \theta \leq 2\pi$, для рассматриваемых ОК примет вид

$$\mathbf{P}_\theta = \left\{ \int_{L(\theta, x')} \mu(x', y') dy' \mid -R \leq x' \leq R \right\}, \mu(x, y) = 0 \mid (x, y) \in \mathbf{R} \setminus \mathbf{S}. \quad (5)$$

Замечание 1. Отметим, что для тел вращения, которыми и являются рассматриваемые объекты контроля, при совпадении точки O системы координат XOY с центром вращения (центром предметного стола) O' проекции для разных ракурсов одинаковы. В формализованном виде это условие запишется следующим образом

$$\forall \theta_1, \theta_2 \ (0 \leq \theta_1 \leq 2\pi) \wedge (0 \leq \theta_2 \leq 2\pi) \wedge (\theta_1 \neq \theta_2) \Rightarrow \mathbf{P}_{\theta_1} \equiv \mathbf{P}_{\theta_2}. \quad (6)$$

Замечание 2. Соблюдение наложения точек O и O' друг на друга имеет исключительно важное значение на производительность сканирования в томографии, на выбор алгоритма обработки информации и производительность реконструкции изображений сечений.

2.2 Исходные параметры виртуальной системы РКТ

Исходные параметры виртуальной системы РКТ сопоставляются не только с числами, с материалами (плотности и соответствующие эффективные атомные номера), но и с функциями.

В блок исходных параметров входят параметры, характеризующие источник и детектор рентгеновского излучения, а также поворотный стол.

2.2.1 Характеристики источника рентгеновского излучения

К параметрам ИРИ относятся:

- режим излучателя (импульсный — Imp, непрерывный — Cont);
- частота следования импульсов для импульсного режима рентгеновского излучателя ν , ГЦ;
- максимальная энергия рентгеновского излучения E_{\max} ;
- материал мишени в рентгеновском аппарате, плотность ρ_t , г/см³, эффективный атомный номер Z_t ;
- материал предварительного фильтра, плотность ρ_f , г/см³, эффективный атомный номер Z_f ;

— поток фотонов, попадающих на фронтальную поверхность детектора ЛДРИ в случае отсутствия ОК, n_0 , фотонов/(см²·с)

— энергетический спектр источника рентгеновского излучения $f(E, E_{\max})$ с учётом характеристических линий материала мишени и ослабления материалом предварительного фильтра.

2.2.2 Характеристики детектора рентгеновского излучения

Основными параметрами ДРИ являются:

- режим регистрации (счётный — Calc, интегральный — Int);
- тип детектора (линейный — Lin, панельный — Flat);
- количество детекторов в детекторе M_L для Lin и $M_F \times N_F$ для Flat;
- материал радиационно-оптического преобразователя (РОП), плотность ρ_d , г/см³, эффективный атомный номер Z_d ;
- толщина РОП h_d , см;
- размер РОП в направлении сканирования a_d , см; размер единичного РОП в перпендикулярном направлении b_d , см;
- разрядность аналого-цифрового преобразователя (АЦП) k_{ADC} , бит;
- время формирования цифрового сигнала Δt ;
- предельный уровень цифрового сигнала (ЦС) для интегрального режима регистрации C_{lim} , служащий для предотвращения превышения им максимального значения ЦС C_{max}

$$C_{\text{lim}} < 2^{k_{\text{ADC}}} - 1 = C_{\text{max}} . \quad (7)$$

2.2.3 Параметры поворотного стола

Поворотный стол предназначен для вращения объекта контроля и, соответственно, обеспечения сканирования его (объекта) пучком рентгеновского излучения и формирования синопграмм. Для обеспечения рационального расположения ОК перед системой ИОИ+ДРИ поворотный стол также обеспечивает поступательное перемещение объекта по вертикали.

Главным потребительскими параметрами поворотного стола являются:

- режим вращения (непрерывный — RCont, дискретный — RDisc);

— режим вертикального перемещения (непрерывный — VCont, дискретный — VDisc);

— угловая скорость вращения для непрерывного режима вращения ω , оборот/с;

— шаг по углу для дискретного режима вращения $\Delta\theta$, °;

— скорость вертикального перемещения для непрерывного режима V_v , мм/с;

— шаг вертикального перемещения для дискретного режима Δz , мм.

Отметим, дискретность процессов формирования и обработки информации в целом приводит к условной замене в математической модели РКТ непрерывных режимов (вращения, перемещения) дискретными. В результате можно принять, что параметры поворотного стола характеризуют шаг по углу $\Delta\theta$, ° и шаг перемещения по вертикали Δz , мм.

2.3 Адаптация модели формирования синограмм в РКТ

Адаптация модели формирования синограмм в рентгеновской компьютерной томографии базируется на работах [82—85]. Цель диссертационных исследований связана с оценкой артефактов, то есть с необходимостью определения уровня смещений реального распределения ЛКО по сечению ОК относительно «идеального» распределения ЛКО. С этим понятием соотносится понятие «идеальной» синограммы.

2.3.1 Модель формирования «идеальной» синограммы

Упомянутое выше «идеальное» распределение ЛКО соответствует некоей моно-линии гамма-излучения. Энергию этой линии принято называть эффективной энергией E_{eff} , а соответствующее эквивалентное значение ЛКО — эффективным ЛКО μ_{eff} [86—88]. Соответствующие выражения для введения понятий E_{eff} и μ_{eff} через радиационную прозрачность q_x для однородного ослабляющего барьера, характеризуемого толщиной $H_{\text{ТО}}$ и эффективным атомным номером материала $Z_{\text{ТО}}$, имеют вид

$$q_X = \frac{I}{I_0} = \int_0^{E_{\max}} Ef(E, E_{\max}) e^{-\mu(E, Z_{\text{ТО}})H_{\text{ТО}}} dE = e^{-\mu(E_{\text{eff}}, Z_{\text{ТО}})H_{\text{ТО}}} = e^{-\mu_{\text{eff}}(Z_{\text{ТО}})H_{\text{ТО}}}, \quad (8)$$

где I, I_0 — аналоговые сигналы за барьером и без него

Замечание 3. Следует отметить, выражения (8) используются, как правило, при анализе качественных закономерностей ослабления рентгеновского излучения объектом контроля. Поясним этот вывод. Эффективная энергия и эффективный (интегральный) линейный коэффициент ослабления зависят от параметров ИРИ, ДРИ, параметров ОК (интегральной толщины, усреднённой плотности, эффективного атомного номера) [89]. Из анализа (8) следует, что E_{eff} и μ_{eff} зависят и от режима регистрации.

Выражение (8) трансформируется в формулу для оценки толщины ОК в длинах свободного пробега (д.с.п.) p

$$p = -\ln \frac{I}{I_0} = \mu(E_{\text{eff}}, Z_{\text{ТО}})H_{\text{ТО}} = \mu_{\text{eff}}(Z_{\text{ТО}})H_{\text{ТО}}. \quad (9)$$

Для случаев, в которых $E_{\text{eff}} = \text{const}_1 = E_0$ и $\mu_{\text{eff}} = \text{const}_2 = \mu_0$, и формируются идеальные синограммы по формуле, объединяющей и уточняющей (1) и (5),

$$\mathbf{P} = \bigcup_{\theta \in [0, 2\pi]} \mathbf{P}_\theta = \bigcup_{\theta \in [0, 2\pi]} \left\{ P(E_0, x', \theta) = \int_{L(\theta, x')} m(E_0, Z(x', y')) \rho(x', y') dy' \mid |x'| \leq R \right\}, \quad (10)$$

где m — массовый коэффициент ослабления гамма-излучения.

При формировании «идеальной» синограммы следует помнить, что

$$\rho(x, y) = 0 \mid (x, y) \in \mathbf{R} \setminus \mathbf{S}. \quad (11)$$

2.3.2 Связь «идеальной» синограммы и синограммы для рентгеновского излучения

Для описания искомой связи необходимо выражение, связывающее аналоговый сигнал (АС) I с параметрами объекта,

$$I(x', \theta) = C n_0 a_d b_d \int_0^{E_{\max}} E_{\text{ab}}(E, a_d, b_d, h_d) f(E, E_{\max}) e^{-P(E, x', \theta)} \varepsilon(E, h_d) dE, \quad (12)$$

где C — коэффициент трансформации поглощённой энергии рентгеновского излучения в электрическую энергию;

$E_{ab}(E, a_d, b_d, h_d)$ — среднее значение зарегистрированного фотона с энергией E ;

$\varepsilon(E, h_d) = 1 - e^{-\mu(E, \rho_d, Z_d)h_d}$ — эффективность регистрации.

Совокупность АС $\mathbf{I} = \{I(x', \theta) | |x'| \leq A, 0 \leq \theta \leq 2\pi\}$ трансформируется с помощью АЦП в соответствующую совокупность цифровых сигналов (ЦС) \mathbf{I}_d

$$\mathbf{I}_d = \left\{ I_d(x', \theta) = \text{int} \frac{I(x', \theta)}{\Delta_d} \middle| |x'| \leq A, 0 \leq \theta \leq 2\pi \right\}, \Delta_d = \frac{C_{\text{lim}} I(A, \theta)}{2^{k_{\text{ADC}}} - 1}. \quad (13)$$

В соответствии с формулой (9) совокупность ЦС \mathbf{I}_d преобразуется в синопамму для рентгеновского излучения \mathbf{P}_x

$$\mathbf{P}_x = \left\{ P_x(x', \theta) = -\ln \frac{I_d(x', \theta)}{I_d(A, \theta)} \middle| |x'| \leq A, 0 \leq \theta \leq 2\pi \right\}. \quad (14)$$

Для практического воплощения описанной выше обобщённой модели формирования синопамм в РКТ формула (12) нуждается в уточнении и конкретизации. Для описания энергетических спектров ИРИ используют, как правило, формулу Крамерса [90]. Ниже дополним данную формулу учётом характеристического излучения и ослаблением рентгеновского излучения предварительным фильтром.

2.3.3 Адаптация модели формирования с учётом трансформации энергетического спектра источника рентгеновского излучения

Учёт характеристического излучения, возникающего в мишени рентгеновского излучателя, может быть осуществлён с помощью обобщений выражений из работы [91]. Энергетический спектр рентгеновской трубки с учётом характеристического излучения $f^*(E, E_{\text{max}})$ представим в виде суммы формулы Крамерса $f_K(E, E_{\text{max}})$ с весовым множителем α_K и дельта-функций δ_χ с весовыми множителями α_χ . Итоговая формула имеет следующий вид

$$f^*(E, E_{\text{max}}) = \alpha_K f_K(E, E_{\text{max}}) + \sum \alpha_\chi \delta(E - E_\chi). \quad (15)$$

Существующие выражения для вычисления весовых множителей из формулы (15) не в полной мере удовлетворяют исследователей, поэтому могут быть использованы экспериментальные весовые множители.

Предварительная фильтрация приводит к трансформации описания энергетического спектра из $f^*(E, E_{\max})$ в $f(E, E_{\max})$

$$f(E, E_{\max}) = \frac{f^*(E, E_{\max}) e^{-m(E, \rho_f) h_f}}{\int_0^{E_{\max}} f^*(E, E_{\max}) e^{-m(E, \rho_f) h_f} dE}. \quad (16)$$

Замечание 4. При вычислительной реализации (16) нет необходимости в нормировке, так калибровка «по белому» (деление измеренного сигнала с ОК на сигнал без ОК) делает эту процедуру излишней.

Реализация δ -функции в численном виде затруднительна, так как предполагает использование аппроксимаций, например, кривой Гаусса. Применение одного из свойств δ -функции позволяют избежать этих сложностей. После подстановки (15), (16) в (12) с учётом замечания 4 и

обозначений $C_n = C_{n0} a_d b_d$, $\mathbf{d}_d = \begin{pmatrix} a_d \\ b_d \\ h_d \end{pmatrix}$ получим

$$I(x', \theta) = C_n \sum \alpha_\chi E_{ab}(E_\chi, \mathbf{d}_d) e^{-P(E_\chi, x', \theta) - m(E_\chi, Z_f) \rho_f h} \varepsilon(E, h_d) + \\ + C_n \alpha_K \int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E, \mathbf{d}_d) f(E, E_{\max}) e^{-P(E, x', \theta) - m(E, Z_f) \rho_f h} \varepsilon(E, h_d) dE. \quad (17)$$

Выражения (13), (14), (17) являются основой формирования синограмм применительно к задаче оценки артефакта немонотонности и уровня снижения его в случае предварительной фильтрации.

3 Алгоритмы обработки синограмм в рентгеновской компьютерной томографии

В настоящее время разработано значительное количество алгоритмов обработки (реконструкции) синограмм в РКТ, например, [96—99]. Они отличаются по идее, вложенной в алгоритм, по соответствующему базовому интегральному преобразованию, по производительности, по устойчивости к возмущениям. Обсудим некоторые алгоритмы реконструкции.

3.1 Реконструкция с помощью обратного преобразования Радона

3.1.1 Прямое преобразование Радона

В соответствии с прямым преобразованием Радона «идеальные» проекции для условий, описанных выше, находятся по следующей форме

$$P(x', \theta) = \int_{-R}^R \mu(x' \cos \theta - y' \sin \theta, x' \sin \theta + y' \cos \theta) dy'. \quad (20)$$

В работе [83] отмечено, что формулы для вычисления синограмм для изделий, которые структурно состоят из фрагментов с сечениями правильной формы, например, квадратов или кругов, имеют достаточно простое аналитическое описание. В статьях [83, 100] приведены подходы к формированию синограмм для любых сечений, для которых имеются оптические изображения сечений.

Прямое преобразование Радона допускает обращение, называемое обратным преобразованием Радона.

3.1.2 Обратное преобразование Радона

На вход алгоритма реконструкции поступает синограмма **P**. Распределение линейного коэффициента ослабления $\mu(x, y)$ по сечению объекта контроля находится по формуле [101]

$$\mu(x, y) = -\frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^{2\pi} \int_{-R}^R \frac{\partial P(s, \varphi)}{\partial s} \frac{ds}{s - x \cos \varphi - y \sin \varphi} d s d \varphi. \quad (21)$$

Из анализа выражения (21) можно сделать вывод о вычислительной сложности подхода Радона к реконструкции изображений сечений.

3.2 Реконструкция методом обратной проекции с фильтрацией

На настоящий момент времени метод обратной проекции с фильтрацией (ОПФ) продолжает оставаться одним из самых востребованных способов реконструкции изображений в РКТ [83, 97, 102—104].

Метод ОПФ состоит из двух основных этапов — этапа фильтрации и этапа обратной свёртки.

3.2.1 Фильтрация исходной синограммы

На этапе фильтрации исходная синограмма \mathbf{P} трансформируется в фильтрованную синограмму \mathbf{P}_f с помощью операции свёртки. Эта операция описывается следующим образом

$$P_f(x', \theta) = \int P(s, \theta) h(x' - s) ds, \quad (22)$$

здесь h — фильтр, например, Шеппа-Логана [105].

3.2.2 Обратная свёртка

Синограмма \mathbf{P}_f поступает на блок реконструкции и подвергается преобразованию (обратной свёртке). В результате отмеченного преобразования формируется оценка распределения ЛКО $\hat{\mu}(x, y)$ по сечению ОК

$$\hat{\mu}(x, y) = \int_0^{2\pi} P_f(x \cos \theta + y \sin \theta) d\theta. \quad (23)$$

Распределение $\hat{\mu}(x, y)$ и является результатом реконструкции (реконструированным изображением). При необходимости для визуализации его трансформируют в полутоновое изображение.

3.2.3 Наличие артефакта и его мера

Полученную оценку $\hat{\mu}(x, y)$ можно считать несмещённой и говорить об отсутствии артефактов, если с достаточным уровнем близости выполняется следующее приблизительное равенство

$$\hat{\mu}(x, y) \approx \mu(x, y). \quad (24)$$

Если же равенство (24) не выполняется, то мерой артефакта, вызываемого физическим фактором Φ , является функция $\Delta_{\Phi}(x, y)$

$$\Delta_{\Phi}(x, y) = \hat{\mu}(x, y) - \mu(x, y). \quad (25)$$

Исследуемый класс объектов контроля является специфичным и для него можно понизить размерность задачи с двух до единицы. Это означает, что для рассматриваемого случая необходимо оценить методом РКТ радиальное распределение ЛКО $\hat{\mu}(r)$. Для реконструкции $\hat{\mu}(r)$ применяется частный случай преобразования Радона — преобразование Абеля.

3.3 Оценка радиального распределения ЛКО с помощью обратного преобразования Абеля

Применение методов РКТ для объектов с осевой симметрией достаточно широко рассматривается в научной литературе, например, [106—108]. Дыше отмечено, что для подобных объектов преобразование Радона трансформируется в преобразование Абеля. В связи с расширением номенклатуры промышленных изделий из описанного выше класса возросла заметна тенденция увеличения исследований, касающихся реконструкции изображений с помощью преобразования Абеля [109—111].

Преобразование Абеля является обратимым. Поэтому алгоритм моделирования синограмм и реконструкции состоит из двух частей — прямого и обратного преобразования Абеля.

3.3.1 Прямое преобразование Абеля

Пусть имеется радиальное распределение ЛКО $\mu(r)$ по сечению осесимметричного объекта, тогда радиальное распределение лучевых интегралов $P(r)$ описывается формулой

$$P(r) = 2 \int_r^R \frac{\mu(q)q}{\sqrt{q^2 - r^2}} dq. \quad (26)$$

При вычислении интегралов (26) возникает сложность, которая устраняется другим подходом к вычислению проекций в РКТ.

Преобразование Абеля допускает обращение, используемое для реконструкции радиального распределения ЛКО.

3.3.2 Обратное распределение Абеля

Обратное преобразование Абеля связывает синограмму \mathbf{P} , состоящую из одной проекции, с оценкой распределения ЛКО $\hat{\mu}(r)$

$$\hat{\mu}(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{P'(q)}{\sqrt{q^2 - r^2}} dq. \quad (27)$$

Заметим, что выражения (26), (27) имеют смысл в практическом использовании при условии выполнения требований из замечаний 1, 2.

Естественно ожидать, что вычисление интегралов вида (27) по точности и производительности существенно превосходит вычисление интегралов (21).

3.3.3 Наличие артефакта и его мера в РКТ осесимметричных объектов

Аналогично пункту 3.3.3 оценка радиального распределения ЛКО $\hat{\mu}(r)$ является несмещённой, а артефакты отсутствуют, если соблюдается аналогичное (24) соотношение

$$\hat{\mu}(r) \approx \mu(r). \quad (28)$$

Соответственно для физического фактора Φ мера артефакта $\Delta_{\Phi}(r)$ оценивается по формуле

$$\Delta_{\Phi}(r) = \hat{\mu}(r) - \mu(r). \quad (29)$$

В качестве алгоритма реконструкции для рассматриваемого класса объектов логично использовать преобразование Абеля, возможно, с проверкой методом реконструкции на основе ОПФ.

4 Алгоритм (программа) для имитационного моделирования артефактов в РКТ применительно к осесимметричным объектам

Совокупность представленных выше математических соотношений и ограничений представляет собой математическую модель процессов формирования синограмм и реконструкции на основе их обработки радиальных распределений линейных коэффициентов ослабления излучения по сечениям осесимметричных объектов контроля. Эта математическая модель учитывает два важнейших артефакта рентгеновской компьютерной томографии — артефакта ужесточения пучка рентгеновского излучения и артефакта рассеяния.

Предложенная математическая модель легко трансформируется в соответствующий алгоритм. При выборе языка программирования или системы для математических вычислений для реализации алгоритма в виде программы был сделан выбор в пользу системы MathCad, так как эта система позволяет максимально естественным образом перевести язык моделей и алгоритмов в соответствующие программы [100, 112].

Для исключения дублирования текста ниже приведён текст искомой программы для имитационного моделирования анализируемых артефактов с расширенными комментариями, способствующими лучшему пониманию последовательности действий (алгоритма).

В соответствии с изложенным выше алгоритм делится на две взаимосвязанных программы: формирования проекций; реконструкции изображений сечений способом на основе обратного преобразования Абеля. Алгоритм содержит дополнение для графической иллюстрации влияния артефактов ужесточения излучения и рассеяния на качество восстановления.

4.1 Программа формирования проекций в РКТ с учётом ужесточения пучка излучения и рассеяния на примере многослойного шара

Приведём адаптацию программы, предназначенной для имитационного моделирования синограмм в РКТ и учитывающей анализируемые физические артефакты.

Программа состоит из нескольких блоков.

4.1.1 Блок формирования данных по ослаблению гамма-излучения

Данные по взаимодействию гамма-излучения с веществом заимствованы из электронной библиотеки открытого доступа⁴.

На рисунке 5 приведена диалоговая web-страница из отмеченной библиотеки с указанием химических элементов, при обращении к любому из них открывается таблица с энергетическими уровнями E_i и соответствующими значениями МКО m_i и массовыми коэффициентами поглощения (МКП) $m_{en i}$.

Z	Element	Z	Element	Z	Element	Z	Element
1	H Hydrogen	24	Cr Chromium	47	Ag Silver	70	Yb Ytterbium
2	He Helium	25	Mn Manganese	48	Cd Cadmium	71	Lu Lutetium
3	Li Lithium	26	Fe Iron	49	In Indium	72	Hf Hafnium
4	Be Beryllium	27	Co Cobalt	50	Sn Tin	73	Ta Tantalum
5	B Boron	28	Ni Nickel	51	Sb Antimony	74	W Tungsten
6	C Carbon, Graphite	29	Cu Copper	52	Te Tellurium	75	Re Rhenium
7	N Nitrogen	30	Zn Zinc	53	I Iodine	76	Os Osmium
8	O Oxygen	31	Ga Gallium	54	Xe Xenon	77	Ir Iridium
9	F Fluorine	32	Ge Germanium	55	Cs Cesium	78	Pt Platinum
10	Ne Neon	33	As Arsenic	56	Ba Barium	79	Au Gold
11	Na Sodium	34	Se Selenium	57	La Lanthanum	80	Hg Mercury
12	Mg Magnesium	35	Br Bromine	58	Ce Cerium	81	Tl Thallium
13	Al Aluminum	36	Kr Krypton	59	Pr Praseodymium	82	Pb Lead
14	Si Silicon	37	Rb Rubidium	60	Nd Neodymium	83	Bi Bismuth
15	P Phosphorus	38	Sr Strontium	61	Pm Promethium	84	Po Polonium
16	S Sulfur	39	Y Yttrium	62	Sm Samarium	85	At Astatine
17	Cl Chlorine	40	Zr Zirconium	63	Eu Europium	86	Rn Radon
18	Ar Argon	41	Nb Niobium	64	Gd Gadolinium	87	Fr Francium
19	K Potassium	42	Mo Molybdenum	65	Tb Terbium	88	Ra Radium
20	Ca Calcium	43	Tc Technetium	66	Dy Dysprosium	89	Ac Actinium
21	Sc Scandium	44	Ru Ruthenium	67	Ho Holmium	90	Th Thorium
22	Ti Titanium	45	Rh Rhodium	68	Er Erbium	91	Pa Protactinium
23	V Vanadium	46	Pd Palladium	69	Tm Thulium	92	U Uranium

Рисунок 5 — Диалоговая страница обращения к энергетическим зависимостям МКО³

Специфика этих таблиц заключается в том, что они содержат энергетические линии характеристического излучения K , L , N серии. Поэтому объединить данные по МКО в одну таблицу невозможно из-за различия количества строк в данных, соответствующих химическим элементам от алюминия до урана. Система MathCad позволяет работать с текстовыми данными. Каждому химическому элементу с j -ым номером соответствует

⁴ Data: X-Ray Mass Attenuation Coefficients, URL: <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>

текстовой файл j.txt из трёх столбцов: первый столбец — вектор энергий E ; второй столбец — вектор МКО $m^{<j>}$; третий столбец — вектор МКП $m_{en}^{<j>}$.

Служебная команда: изменение индексов от единицы **ORIGIN:=1**

Здесь и далее оттенками зелёного цвета подцвечены команды MathCad.

4.1.2 Блок ввода данных по ослаблению фотонного излучения

Ввод общей информации по химическим элементам ZZM.txt: первый столбец — атомный номер химического элемента; второй столбец — отношение атомного номера к атомной массе **ZM:=READPRN("Data\ZZM.txt")**

Количество анализируемых элементов **i0:=83**

Пересчёт атомных элементов **z:=1..i0**

Атомный номер элемента **Ze_z:=ZM_{z,1}**

Атомная масса элемента **Mz_z:= $\frac{Ze_z}{ZM_{z,2}}$**

Формирование ссылки на файл с данными для z-ого элемента

tab_z:=concat("Data\",num2str(z),".txt")

Ввод данных для z-ого элемента **C_z:=READPRN(tab_z)**

Перевод энергий из эВ в кэВ для z-ого элемента **E_z:=1000×C_z^{<1>}**

Ввод МКО для z-ого элемента **mm_z:=C_z^{<2>}**

Расчёт МКО для чувствительного материала детектора **mm_z:=C_z^{<2>}**

4.1.3 Зависимость МКО z-ого элемента, ЛКО материала детектора от энергии x , зависимость эффективности регистрации от энергии x и толщины детектора h_d

Зависимость МКО z-ого элемента от энергии x **mas(x,z):=interp(E_z,mm_z,x)**

Зависимость ЛКО материала детектора от энергии x (на примере CsI)

$$\mu_d(x) := \left(\text{mas}(x, 55) \frac{Mz_{55}}{Mz_{55} + Mz_{53}} + \text{mas}(x, 53) \frac{Mz_{53}}{Mz_{55} + Mz_{53}} \right) \rho_d$$

Зависимость эффективности регистрации от энергии x и толщины детектора h_d **$\varepsilon(x, h_d) := 1 - e^{-\mu_d(x) h_d}$**

4.1.4 Трансформация энергетического спектра рентгеновского излучения

Формула Крамерса $fK(E_{\max}, x) := \frac{E_{\max}}{x} - 1$

Трансформация формулы Крамерса с учётом ослабления излучения фильтром $f(E_{\max}, x, z_f, \rho_f, h_f) := e^{-\text{mas}(x, z_f) \cdot \rho_f \cdot h_f} \cdot fK(E_{\max}, x)$

4.1.5 Подпрограмма-функция для вычисления толщины объекта контроля в д.с.п. для энергии x

Пусть объект многослойный шар. Количество слоёв $ks0 := 5$

Параметры слоёв ОК, толщина, плотность, атомный номер

$$hs := \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.2 \\ 0.3 \\ 0.4 \\ 0.4 \end{pmatrix} \quad \rho s := \begin{pmatrix} 8.5 \\ 1.0 \\ 7.5 \\ 1.8 \\ 2.7 \end{pmatrix} \quad zs := \begin{pmatrix} 29 \\ 10 \\ 26 \\ 14 \\ 13 \end{pmatrix}$$

Вычисление радиусов слоёв $ks := 2 \dots ks0$ $R_1 := hs_1 \quad R_{ks} := R_{ks-1} + hs_{ks}$

Подпрограмма для вычисления толщины ОК P

$$PE(x, hsr, zss, \rho ss) := \sum_{ks=1}^{ks0} m(x, zss_{ks}) \cdot \rho ss_{ks} \cdot hsr_{ks}$$

здесь hsr толщины слоёв по лучу.

4.1.6 Поток фотонов за ОК

Число фотонов, падающих на фронтальную поверхность детектора $n0$

$$N(Em, hsr, zss, \rho ss, z_f, \rho_f, h_f, n0) := n0 \cdot \int_0^{Em} f(Em, x, z_f, \rho_f, h_f) e^{-PE(x, hsr, zss, \rho ss)} \varepsilon(x, hd) dx$$

$$EM(Em, hsr, zss, \rho ss, z_f, \rho_f, h_f) := \frac{\int_0^{Em} x f(Em, x, z_f, \rho_f, h_f) e^{-PE(x, hsr, zss, \rho ss)} \varepsilon(x, hd) dx}{\int_0^{Em} f(Em, x, z_f, \rho_f, h_f) e^{-PE(x, hsr, zss, \rho ss)} \varepsilon(x, hd) dx}$$

$$I(Em, hsr, zss, \rho ss, z_f, \rho_f, h_f, n0) := N(Em, hsr, zss, \rho ss, z_f, \rho_f, h_f, n0) \cdot EM(Em, hsr, zss, \rho ss, z_f, \rho_f, h_f)$$

4.1.7 Вычисление толщины объекта по лучу с координатами (x,y)

Входные данные подпрограммы-функции координаты точки (x,y) и радиусы Rs

$$\begin{aligned}
 & r \leftarrow \sqrt{x^2 + y^2} \\
 & res \leftarrow \begin{pmatrix} \sqrt{Rs_1^2 - r^2} \\ \sqrt{Rs_2^2 - r^2} - \sqrt{Rs_1^2 - r^2} \\ \sqrt{Rs_3^2 - r^2} - \sqrt{Rs_2^2 - r^2} \\ \sqrt{Rs_4^2 - r^2} - \sqrt{Rs_3^2 - r^2} \\ \sqrt{Rs_5^2 - r^2} - \sqrt{Rs_4^2 - r^2} \end{pmatrix} \quad \text{if } (r \leq Rs_1) \\
 & res \leftarrow \begin{pmatrix} 0 \\ \sqrt{Rs_2^2 - r^2} \\ \sqrt{Rs_3^2 - r^2} - \sqrt{Rs_2^2 - r^2} \\ \sqrt{Rs_4^2 - r^2} - \sqrt{Rs_3^2 - r^2} \\ \sqrt{Rs_5^2 - r^2} - \sqrt{Rs_4^2 - r^2} \end{pmatrix} \quad \text{if } (Rs_1 < r \leq Rs_2) \\
 & H(x, y, Rs) := res \leftarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \sqrt{Rs_3^2 - r^2} \\ \sqrt{Rs_4^2 - r^2} - \sqrt{Rs_3^2 - r^2} \\ \sqrt{Rs_5^2 - r^2} - \sqrt{Rs_4^2 - r^2} \end{pmatrix} \quad \text{if } (Rs_2 < r \leq Rs_3) \\
 & res \leftarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \sqrt{Rs_4^2 - r^2} \\ \sqrt{Rs_5^2 - r^2} - \sqrt{Rs_4^2 - r^2} \end{pmatrix} \quad \text{if } (Rs_3 < r \leq Rs_4) \\
 & res \leftarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \sqrt{Rs_5^2 - r^2} \end{pmatrix} \quad \text{if } (Rs_4 < r \leq Rs_5)
 \end{aligned}$$

4.1.8 Формирование проекции

Регистратор рентгеновского излучения — панельный детектор Perkin Elmer

Разрядность АЦП $Kadc:=16$ Коэффициент ограничения ЦС $Cadc:=1.2$

Размер панельного детектора $A:=50$ мм $B:=50$ мм

Физический размер пикселя $a:=0.05$ мм $b:=50$ мм

Размер детектора в пикселях $M := floor\left(\frac{A}{a}\right)$ $N := floor\left(\frac{B}{b}\right)$

Размер А свяжем с индексом ix , а В с iy $ix:=1..M$ $iy:=1..N$

Центр ОК в мм вблизи центра панели $Aoc := \frac{A}{2}$ $Boc := \frac{B}{2}$

Распределение лучевой толщины ОК по плоскости изображения в см $H(x,y)$

Координаты центров пикселей $xp_{ix} := -\frac{A}{2} + \frac{a}{2} + a \cdot (ix - 1)$

$yp_{iy} := -\frac{B}{2} + \frac{b}{2} + b \cdot (iy - 1)$ Толщины $Hr_{ix,iy} := H(xp_{ix}, yp_{iy}, R)$

Максимальная энергия $E_{max}:=160$ кэВ Число фотонов $n0:=10^6$

Распределение числа фотонов по изображению

$Noc_{ix,iy} := N(E_{max}, Hr_{ix,iy}, z_s, \rho_s, z_f, \rho_f, hf, n0)$

Распределение АС $Ioc_{ix,iy} := I(E_{max}, Hr_{ix,iy}, z_s, \rho_s, z_f, \rho_f, hf, n0)$

За шумление и оцифровка сигналов

$I0 := \max(Ioc)$ $\Delta D := \frac{I0 \cdot Cadc}{2^{Kadc} - 1}$ $\alpha := 0.00001$

$$Id_{ix,iy} := floor \left(\frac{\max \left(\alpha, 1 + \frac{\sqrt{-2 \cdot \ln(\text{rnd}(1)) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \text{rnd}(1))}}{\sqrt{Noc_{ix,iy}}} \right)}{\Delta D} \right) Ioc_{ix,iy}$$

Количество белых строк $iyc:=20$. Оценка ЦС по белому

$$MId := \frac{\sum_{ix=1}^N \sum_{iyc=1}^{iyc} Id_{ix,iyc}}{N \cdot iyc}$$

Формирование проекций $Y_{ix,iy} := \ln \frac{Id_{ix,iy}}{MId}$

Иллюстрация проекции $Y \min := \min(Y) \quad Y \max := \max(Y)$
 $P_{ix,iy} := 255 - \text{floor} \left(255 \cdot \frac{Y_{ix,iy} - Y \min}{Y \max - Y \min} \right)$

Запись иллюстрации 2D проекции в файл $WRITEBMP := ("Proection.bmp")$

Запись одномерных проекций по нескольким сечениям

Количество сечений $istr0:=11$ Счётчик сечений $istr:=1..11$

$ir:=1..N$ $R_{ir} := -\frac{A}{2} + \frac{a}{2} + a \cdot (ir - 1)$

Номера сечений $nstr_{istr} := \text{floor} \left(\frac{N}{2} \right) - 200 + (istr - 1) \cdot 50$

Название файлов

$nstr_{istr} := \text{floor} \left(\frac{N}{2} \right) - 200 + (istr - 1) \cdot 50$
 $fil_{istr} := \text{concat} ("a =", \text{num2str}(a), "nstr =", \text{num2str}(nstr_{istr}), "R0 =", \text{num2str}(R_5), ".txt")$

Запись имён файлов проекций $WRITEPRN("FILE.txt") := fil$

Запись проекций в файлы $WRITEPRN(file_{istr}) := \text{augment} (RR, Y^{<nstr_{istr}>})$

Полный текст программы приведён в приложении.

4.2 Алгоритм (программа) реконструкции изображений сечений на основе обратного преобразования Абеля

Алгоритм (программа) реконструкции изображений сечений на основе обратного преобразования Абеля реализована в виде подпрограммы `Invers_Abel`. Единственным входным параметром этой подпрограммы является имя файла `file`. На выход подаются два изображения: **PP** — распределение информативного параметра по сечению ОК (числовая матрица); **r** — соответствующее полутоновое изображение (матрица полутонов). В файле `file` записана матрица (таблица) из двух столбцов: в первом аргумент (радиус **RR**); во втором функция (проекция **Proe**).

```

pos ← search(file,"=",0)
re ← substr(file,pos+1,pos+2)
a ← str2num(re)
C ← READPRN(file)
N ← rows(C)
RR ← C<1> · 0.1
Proe ← C<2>
pr ← medsmooth(proe,1)
Ami ← min(RR)
Ama ← max(RR)
A ← (Ama – Ami) · 0.5
h2 ←  $\frac{N}{2 \cdot 2 \cdot A}$ 
for i ∈ 1..N
|
|   proii ← (pri+1 – pri-1) · h2 if 2 ≤ i ≤ N – 1
|   otherwise
|   |
|   |   proi1 ← (–3 · pr1 + 4 · pr2 – pr3) · h2 if i = 1
|   |   proiN ← (prN-2 – 4 · prN-1 + 3 · prN) · h2 if i = N
|   |
vpr ← cspline(RR,proi)
prr(z) ← interp(vpr,RR,proi,z)
ff(x) ←  $\begin{cases} 0 & \text{if } 0 < x < 0.00001 \vee x > |A - 0.00001| \\ \frac{-1}{\pi} \cdot \int_{|x|+0.00001}^A \frac{prr(z)}{\sqrt{z^2 - x^2}} dz & \text{otherwise} \end{cases}$ 
NN ← 1500
hh ←  $\frac{A}{NN}$ 
for ii ∈ 1...N
|
|   rrii ← hh · (ii – 1)
|   ρphii ← ff(rrii)
ph ← medsmooth(ρph,5)
vp ← cspline(rr,ph)
v(z) ← interp(vp,rr,ph,z)
Nx ← 1800
hx ←  $\frac{2 \cdot A}{Nx}$ 

```

Invers_Abel(file) :=

Окончание подпрограммы Invers_Abel

```

for ix ∈ 1..Nx
  for iy ∈ 1..Ny
    
$$\begin{cases} X_{ix} \leftarrow -A + ix \cdot hx \\ Y_{iy} \leftarrow -A + iy \cdot hy \\ rd \leftarrow \sqrt{X_{ix}^2 + Y_{iy}^2} \\ PP_{ix,iy} \leftarrow \begin{cases} 0 & \text{if } rd > A \\ \max(0, v(rd)) \end{cases} \end{cases}$$

  mip ← min(PP)
  map ← max(PP)
  mm ← map – mip
  for ix ∈ 1..Nx
    for iy ∈ 1..Ny
      
$$\begin{cases} mm \leftarrow 0 & \text{if } mm = 0 \\ r_{ix,iy} \leftarrow 220 - 220 \cdot \frac{PP_{ix,iy} - mip}{mm} & \text{otherwise} \end{cases}$$

    
$$\begin{pmatrix} r \\ PP \end{pmatrix}$$


```

Оценка времени работы подпрограммы, начальный момент $t1 := \text{time}(t1)$

Ввод имён проекций $fill := \text{REDPRN}("FILE.txt")$

Количество проекций $i0 := \text{rows}(fill)$ Счётчик проекций $i := 1..i0$

Применение процедуры Invers_Abel $RES_i := \text{Invers_Abel}(fill_i)$

Имена файлов с изображениями сечений

$f_i := \text{concat}("BMP \setminus ", fill_i, ".bmp")$

Запись изображений $\text{WRITEBMP}(f_i) := (RES_i)_1$

Оценки радиальных распределений $P_i := (RES_i)_2$

Имена файлов с радиальными распределениями

$frd_i := \text{concat}("TXT \setminus ", fill_i, ".txt")$

Запись текстовых файлов с радиальными распределениями

$\text{WRITEPRN}(frd_i) := P_i$

Оценка времени вычислений $t2 := time(2) - t1 =$

Текст подпрограммы `Invers_Abel` полностью соответствует модели реконструкции проекций на основе обращения преобразования Абеля. Имеющиеся нюансы связаны с возможностью фильтрации, с необходимостью интерполяции дискретных зависимостей.

Анализ влияния физических артефактов на качество реконструкции осуществляется сравнением оценок радиальных распределений для проекций, искажённых той или иной физической причиной, и «идеальных» проекций (для моноэнергетического источника гамма-излучения). Эти радиальные распределения располагаются в папке ТХТ.

Графическая иллюстрация влияния артефактов ужесточения излучения и рассеяния на качество восстановления сводится к представлению на одном графике радиальных зависимостей $\hat{\mu}_0(r), \hat{\mu}_g(r), \hat{\mu}_s(r)$, здесь $\hat{\mu}_0(r)$ — реконструированная зависимость ЛКО от радиуса для гамма-излучения, $\hat{\mu}_g(r)$ — реконструированная зависимость ЛКО от радиуса для рентгеновского излучения со спектром $g(E, E_{\max})$, $\hat{\mu}_s(r)$ — реконструированная зависимость ЛКО от радиуса для рентгеновского или гамма-излучения с учётом рассеяния фотонов в объекте контроля.

Совокупность приведённых выше программ позволяет не только оценить уровни артефактов, но и исследовать возможные подходы к их снижению, например, увеличением толщины предварительных фильтров, рациональным выбором максимальных энергий, степенью коллимации источников и детекторов излучения и т.п.

5 Моделирование артефактов в РКТ на примере многослойного шара

Для оценки работоспособности разработанных моделей, алгоритмов и программ был выбран многослойный объект в форме шара. Материалы слоёв отличаются между собой по плотности и атомному номеру.

Рассмотрим пятислойный шар с одинаковыми толщинами слоёв, равными 4 мм. Наиболее полно такой объект контроля характеризуют вектора радиусов слоёв **Rs**, плотности материалов слоёв **ρs** и эффективного атомного номера **Zs**. Пример иллюстративный, поэтому выберем следующие значения характеристик тестового объекта

$$Rs := \begin{pmatrix} 4 \\ 8 \\ 12 \\ 16 \\ 20 \end{pmatrix} \quad \rho s := \begin{pmatrix} 8.5 \\ 1 \\ 2.7 \\ 1.6 \\ 7.8 \end{pmatrix} \quad Zs := \begin{pmatrix} 29 \\ 5 \\ 13 \\ 9 \\ 26 \end{pmatrix}.$$

Радиусы приведены в мм, плотность в — г/см³.

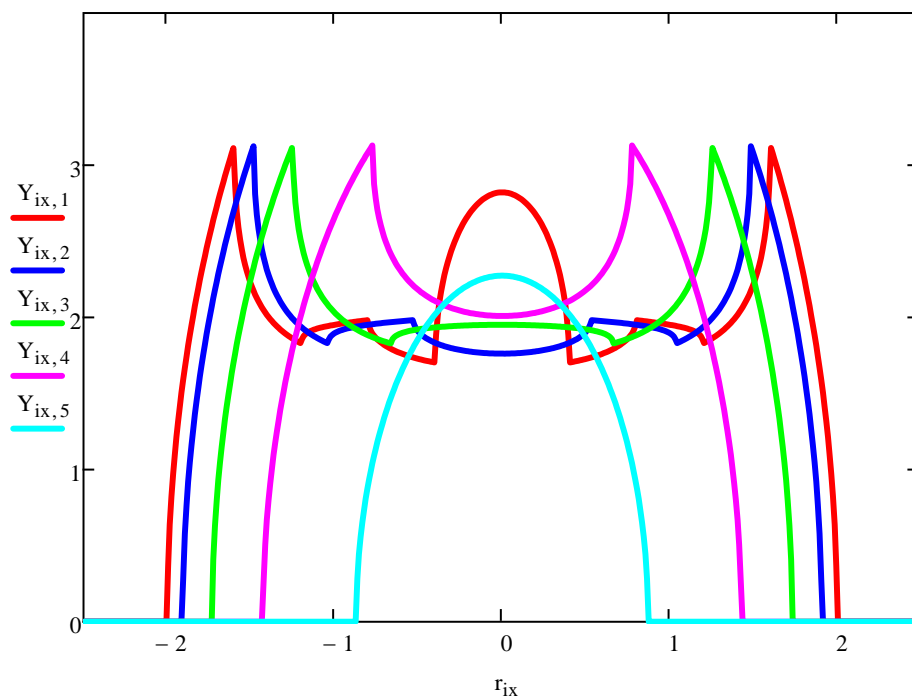
Для регистрации фотонного излучения выбран СД на основе CsI. Плотность сцинтиллятора 4,51 г/см³, толщина 1 мм. Разрядность АЦП — 16 бит. Размер детектора — 50×50 мм². Размер пикселя — 0,1×0,1 мм².

5.1 Моделирование и обработка синограмм для гамма-излучения

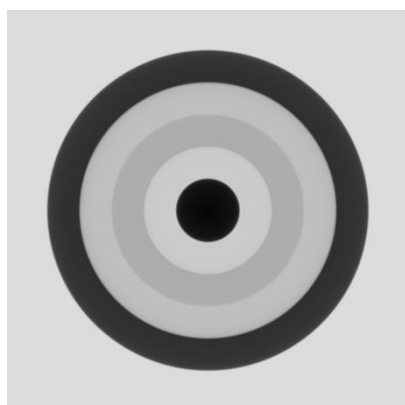
«Идеальная» проекция моделируется для моноэнергетического источника гамма-излучения с линией $E_0=179$ кэВ. Для моноэнергетического источника в процедуре вычислений отсутствуют интегралы, поэтому процесс моделирования отличается высоким быстродействием, в данном случае время формирования проекций для пяти сечений ОК не превышает половины минуты. Для наглядности рассматривались сечения на равном удалении от границ каждого слоя.

На рисунке 6 приведены копии проекций (радиальные распределения лучевых толщин испытуемого объекта в д.с.п.), построенные собственными

средствами системы MathCad. Все пять проекций приведены на одном рисунке. Для удобства восприятия проекции ассоциированы с одним цветом.



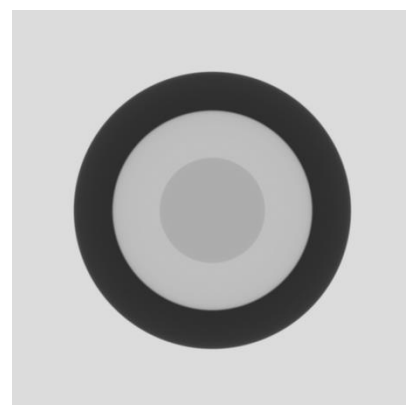
Проекция для пяти сечений



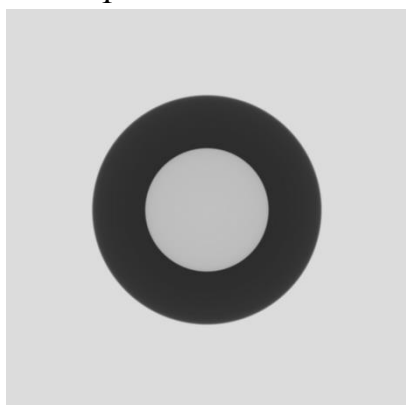
1



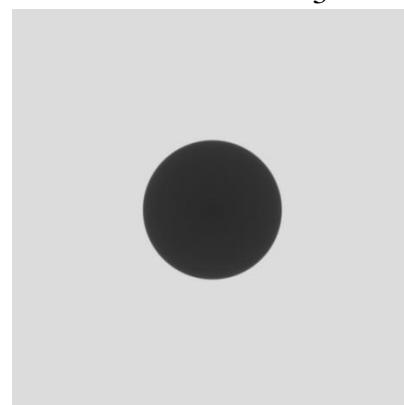
2



3



4



5

Реконструкции изображений сечений

Рисунок 6 — Результаты моделирования проекций и результатов их обработки для шарового пятислойного объекта

Результаты реконструкции пяти сечений также приведены на рисунке 6. Все полутоновые изображения сечений 1—5 формировались для одних тех же параметров преобразования цифровых изображений в полутоновые.

Реконструированные изображения сечений визуально выглядят вполне качественно. Более точно качество реконструкции оценивается методом сравнения полученных распределений по осевой линии сечения $\mu(r)$ и истинных распределений ЛКО $\mu_0(r)$. Целесообразно распределения $\mu(r)$ и $\mu_0(r)$ приводить на одном графике.

На рисунке 7 приведены результаты сравнения реконструируемых $\mu(r)$ и реальных $\mu_0(r)$ радиальных распределений линейного коэффициента ослабления для характерных сечений объекта контроля, отмеченных выше, для моноэнергетического источника гамма-излучения.

Из анализа сравниваемых графиков распределений, представленных на рисунках 7.1—7.5, можно сделать вывод о близости реальных и оценочных распределений ЛКО. Искажения наиболее заметны на участках с резкими изменениями ЛКО. Чем значительнее перепад по амплитуде в конкретной точке, тем значимее искажения в ближайших к ней точках и тем более дальние точки будут вовлечены в это влияние. Отмеченные искажения связаны с методом реконструкции и с излишне примитивным подходом к регуляризации.

Сделаем некоторые коррекции к вычислению интеграла (27) применительно к рассматриваемой задаче

$$\hat{\mu}(r) = -\frac{1}{\pi} \int_{r+\alpha \cdot \text{sign}(r)}^A \frac{P'(q)}{\sqrt{q^2 - r^2}} dq, \quad (30)$$

где sign — знак аргумента; α — параметр коррекции. Для снижения влияния шумов проекции подвергаются фильтрации, фильтрации дополнительно подвергается и сигнал с производными.

Была использована медианная фильтрация проекций по пяти точкам и медианная фильтрация производных по трём точкам. Помимо этого, выбрали

значение параметра коррекции $\alpha=0,00002$. На рисунке 8 приведены сравнения идеальных и реконструированных распределений ЛКО.

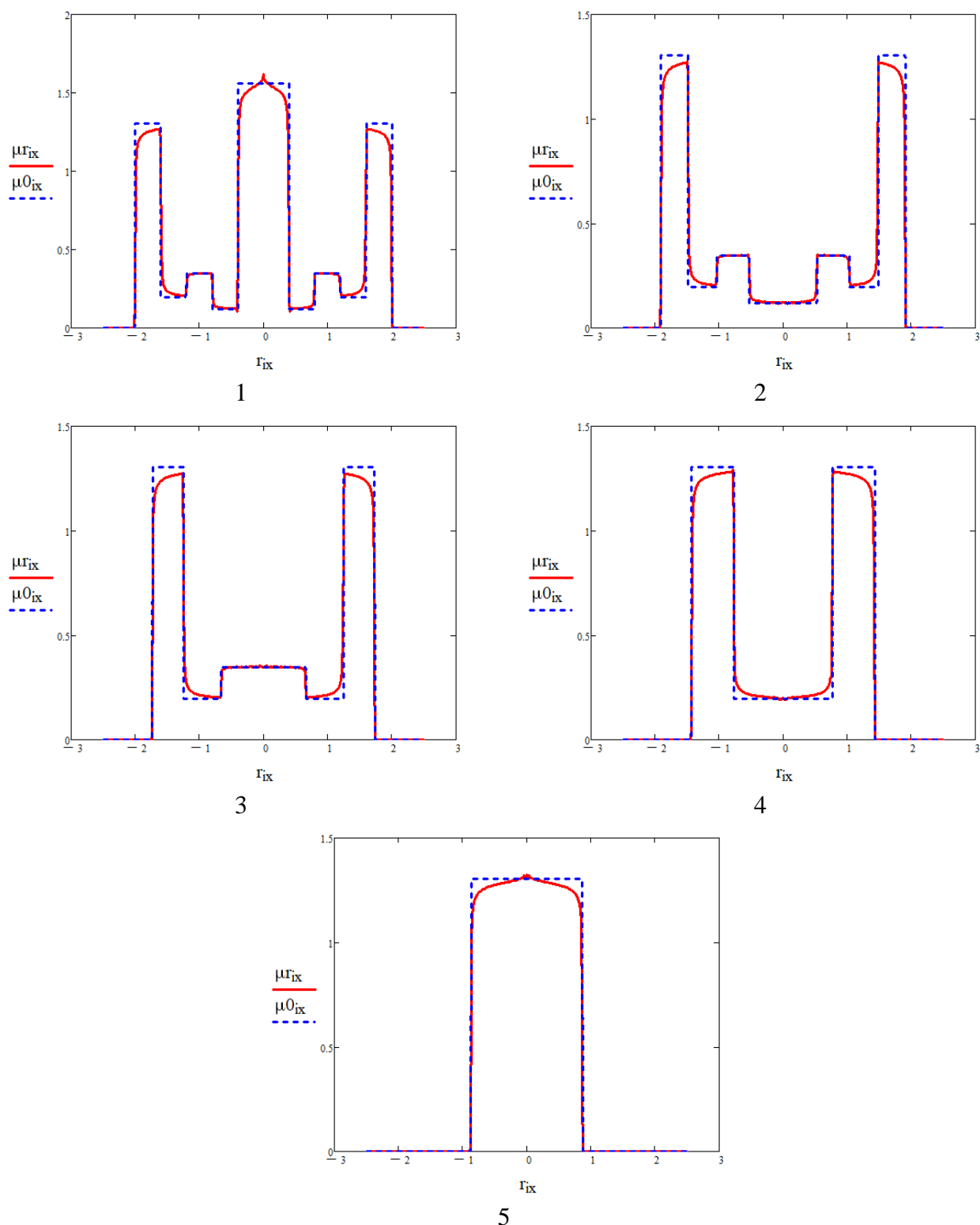


Рисунок 7 — Сравнение реконструируемых $\mu r(r)$ и реальных $\mu 0(r)$ радиальных распределений ЛКО для сечений ОК

Анализ представленных графиков показал правильность сформулированного выше вывода для всех сечений ОК и возможность

использования предложенных моделей, алгоритмов и программ для исследования влияния физических артефактов на качество восстановления изображений сечений не только рассматриваемого тестового объекта, но и любого другого осесимметричного объекта с произвольной структурой.

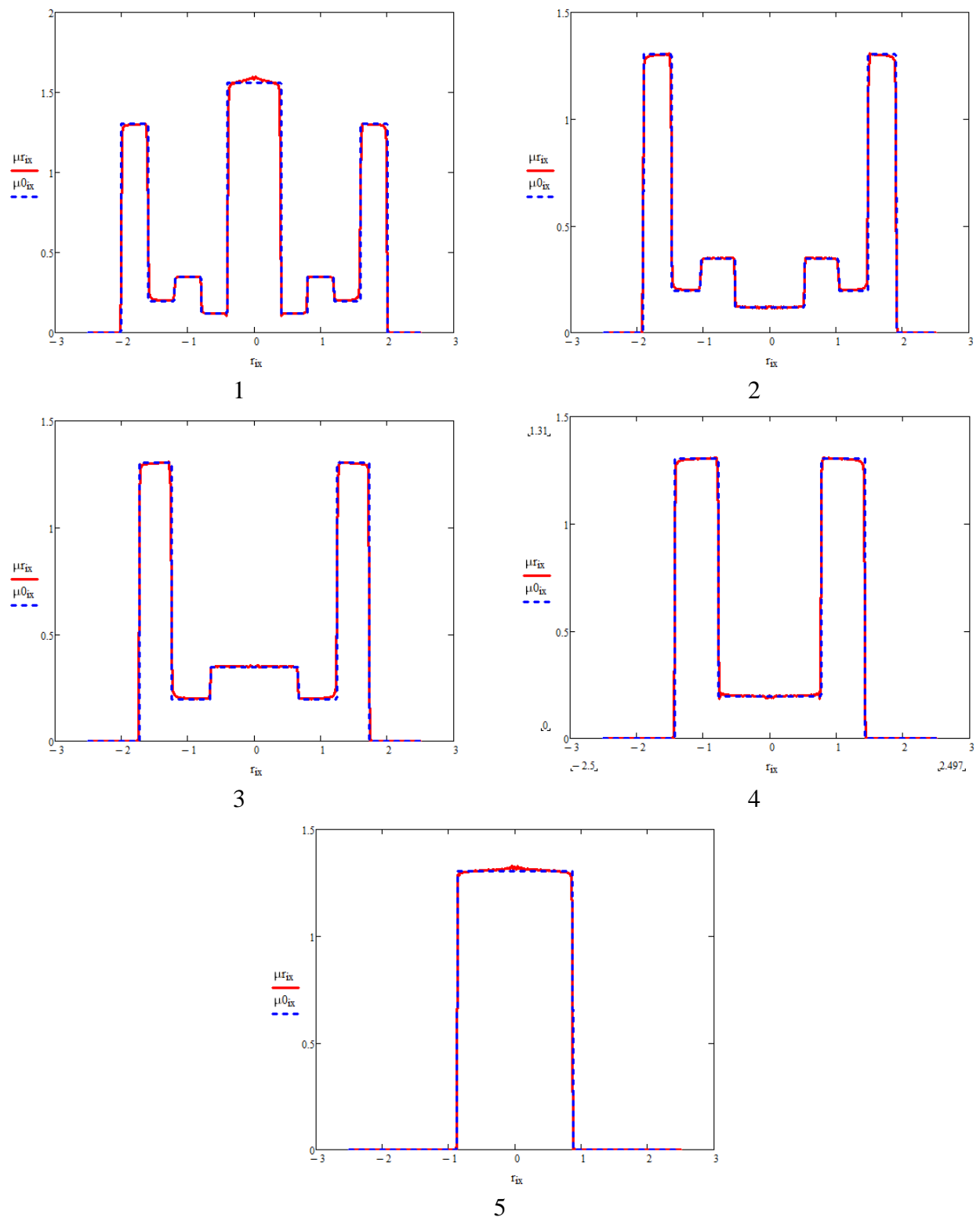


Рисунок 8 — Сравнение результатов применения модернизированных алгоритмов реконструкции $\mu_r(r)$ и реальных радиальных распределений $\mu_0(r)$

Далее используем предложенные модели и алгоритмы для оценки анализируемых артефактов. Логично исследовать артефакты по мере усложнения модели. Поэтому начнём с учёта рассеяния для источников моноэнергетического гамма-излучения.

5.2 Оценка артефактов рассеяния в РКТ для моноэнергетического гамма-излучения

Выше отмечено, что наиболее простой способ учёта рассеяния базируется на выражении (18) и сводится к мультипликативной корректировке.

$$N(Em, hsr, ps, pf, pd, n0) := N(Em, hsr, ps, pf, pd, n0) \cdot Em \cdot (1 + k_{scat} \cdot PE(Em, hsr, ps)). \quad (31)$$

Коэффициент может принимать большие значения. Применение коллиматоров позволяет существенно снизить значения коэффициента k_{sca} до уровня 0,1 или даже 0,05.

На рисунке 9 приведены реконструированное изображение сечения и распределение $\mu s(r)$ для $k_{scat}=0,1$ для центрального слоя шара.

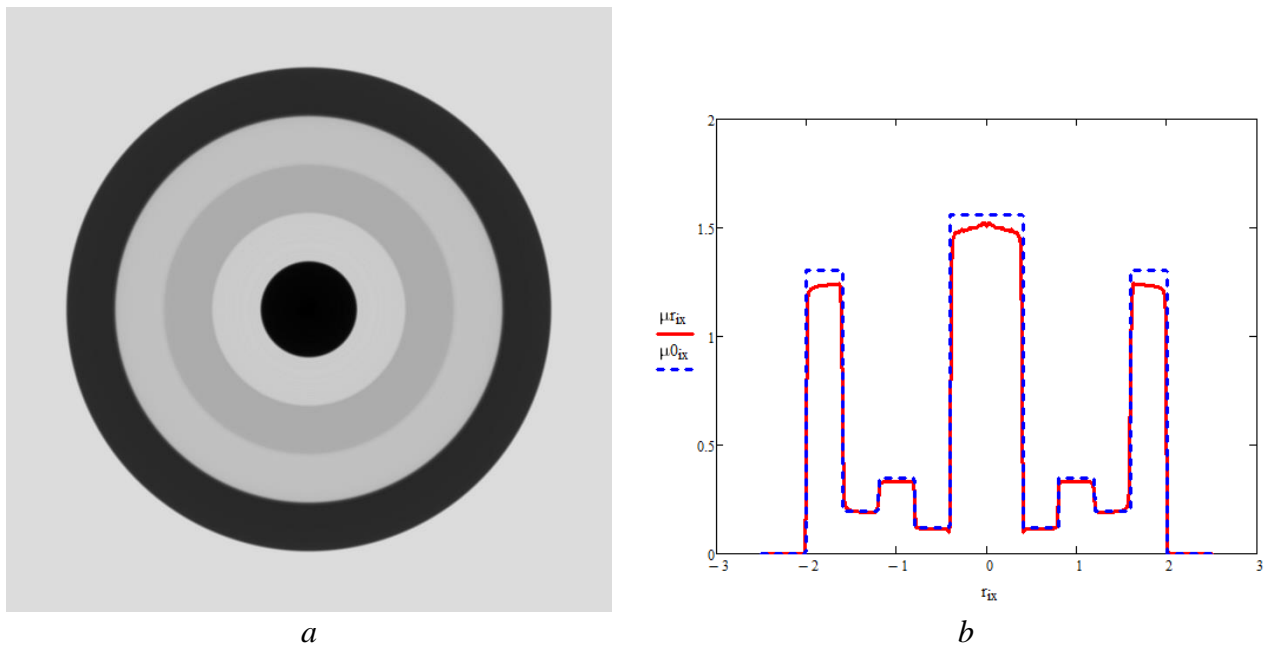


Рисунок 9 — Визуализация артефакта рассеяния для моноэнергетического излучения для $k_{scat}=0,1$ и центрального сечения шара:

a — изображение сечения; b — радиальное распределение реконструкции $\mu r(r)$ и реальное радиальное распределение $\mu 0(r)$

Визуально реконструированное изображение сечения шара с учётом рассеяния выглядит аналогично рисунку 6.1. Оценка же ЛКО гамма-излучения, как показывают данные, приведённые на рисунке 9, может оказаться существенно заниженной.

5.3 Моделирование артефактов ужесточения пучка в РКТ

Для рассмотренного выше примера объекта контроля исследуем влияние артефакта ужесточения пучка излучения. Для этого в качестве источника фотонов используется источник рентгеновского излучения с максимальной энергией $E_{\max}=300$ кэВ. Для первичного ослабления рентгеновского излучения применяется фильтр из меди толщиной 3 мм.

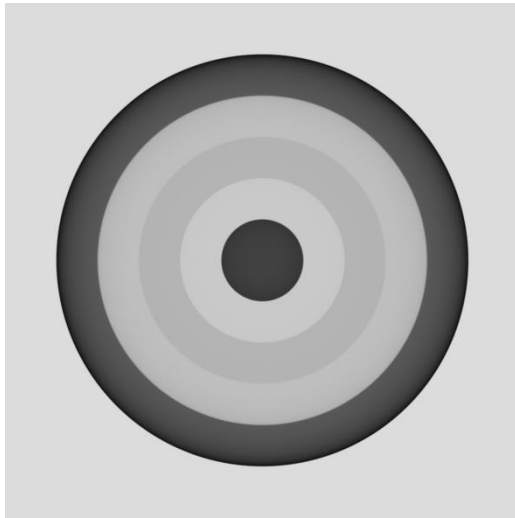
Для построения идеальной проекции и проведения процесса реконструкции выбор эффективной энергии (удобнее эффективного ЛКО) осуществлялся для луча, проходящего через центр рассматриваемого ОК.

5.3.1 Энергетический спектр без учёта характеристического излучения

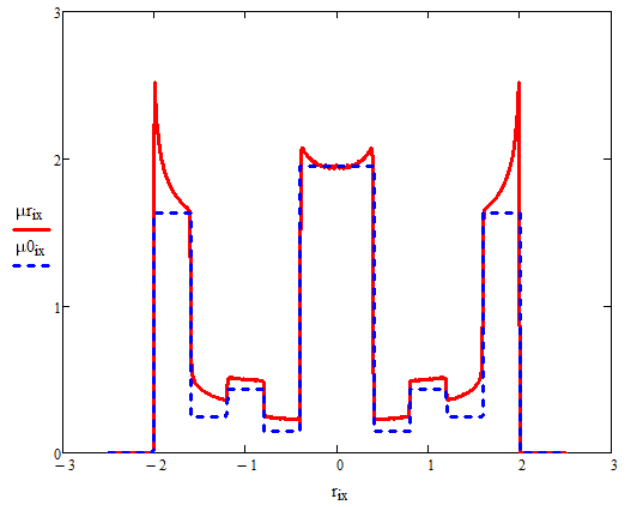
На рисунке 10 приведена визуализация проявления ужесточения пучка РИ в виде реконструированного изображения (рисунки 10.*a*) и радиального распределения оценок ЛКО (рисунки 10.*b*) для трёх сечений ОК.

На реконструированных изображениях сечений наблюдаются заметное потемнение на границах внешнего слоя многослойного шара. Графики позволяют более наглядно и детально исследовать влияние эффекта ужесточения пучка рентгеновского излучения. Смещение ЛКО, исходя из анализа графиков, приведённых на рисунке 10.*b*, может достигать 70 %. Отмеченный факт свидетельствует о значимости анализируемого физического артефакта на качество восстановления сечений (распределений ЛКО по сечениям) и о практической невозможности оценки плотности в конкретной точке сечения исследуемого объекта контроля с приемлемой точностью, например, 5 %. Следует отметить, что результаты получены для отфильтрованного излучения. Толщины 1 мм медного фильтра для должной фильтрации рентгеновского излучения с максимальной энергий $E_{\max}=300$ кэВ

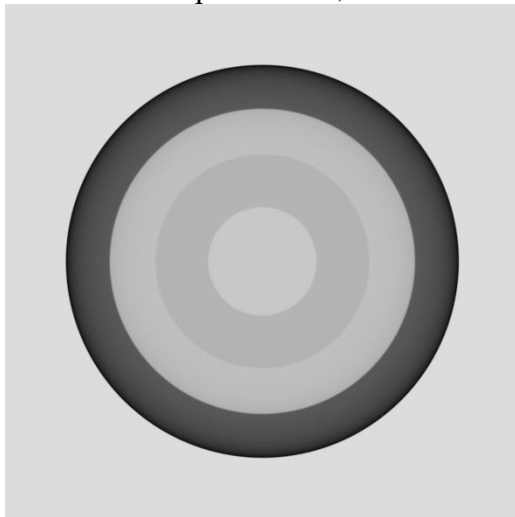
явно недостаточно. В работе [106] рассматриваются вопросы превращения ИРИ в псевдо-монохроматический источник излучения. Увеличим толщину фильтра.



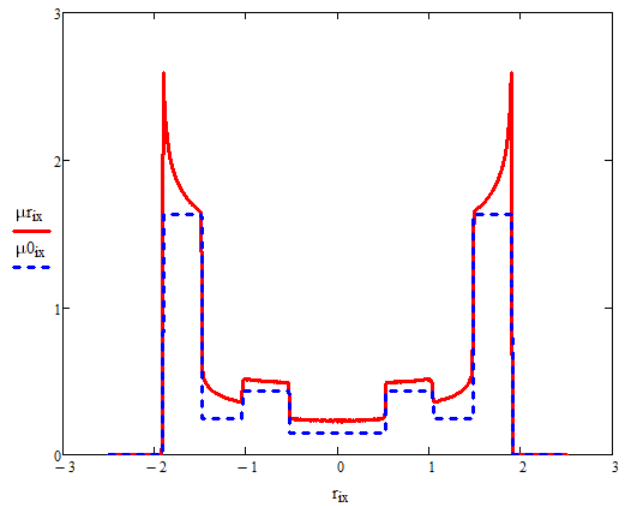
Первый слой, *a*



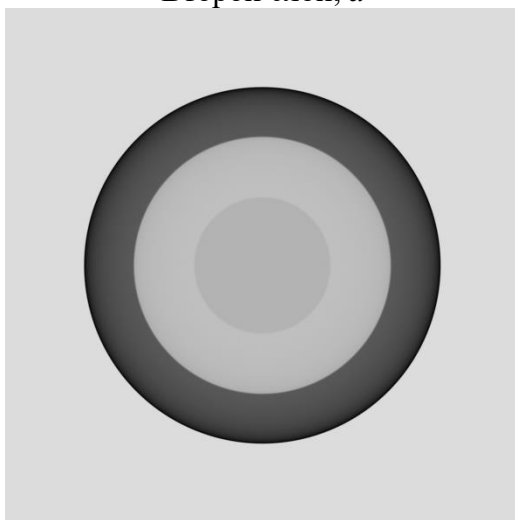
b



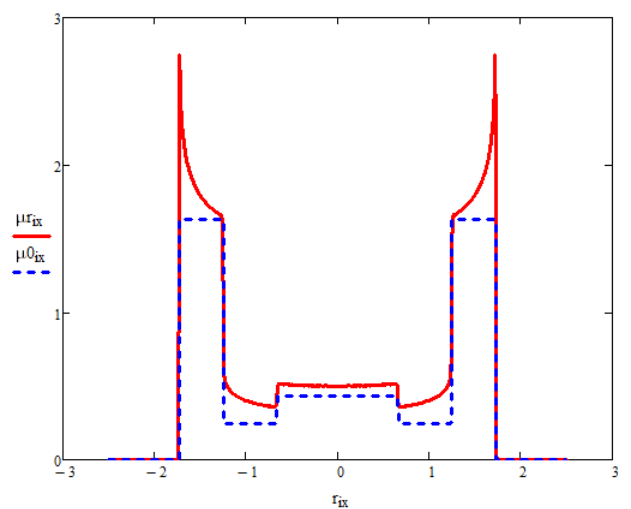
Второй слой, *a*



b



a



b

Рисунок 10 — Визуализация артефакта ужесточения пучка излучения для сечений шара, медный фильтр толщиной 1 мм: *a* — изображение сечения; *b* — радиальное распределение реконструкции $\mu r(r)$ и реальное радиальное распределение $\mu 0(r)$

Был проведён вычислительный эксперимент по формированию и обработке информации в РКТ для приведённых выше условий и $h_f=10$ мм. На рисунке 11 приведены изображения реконструированных первых трёх сечений и распределения оценок ЛКО.

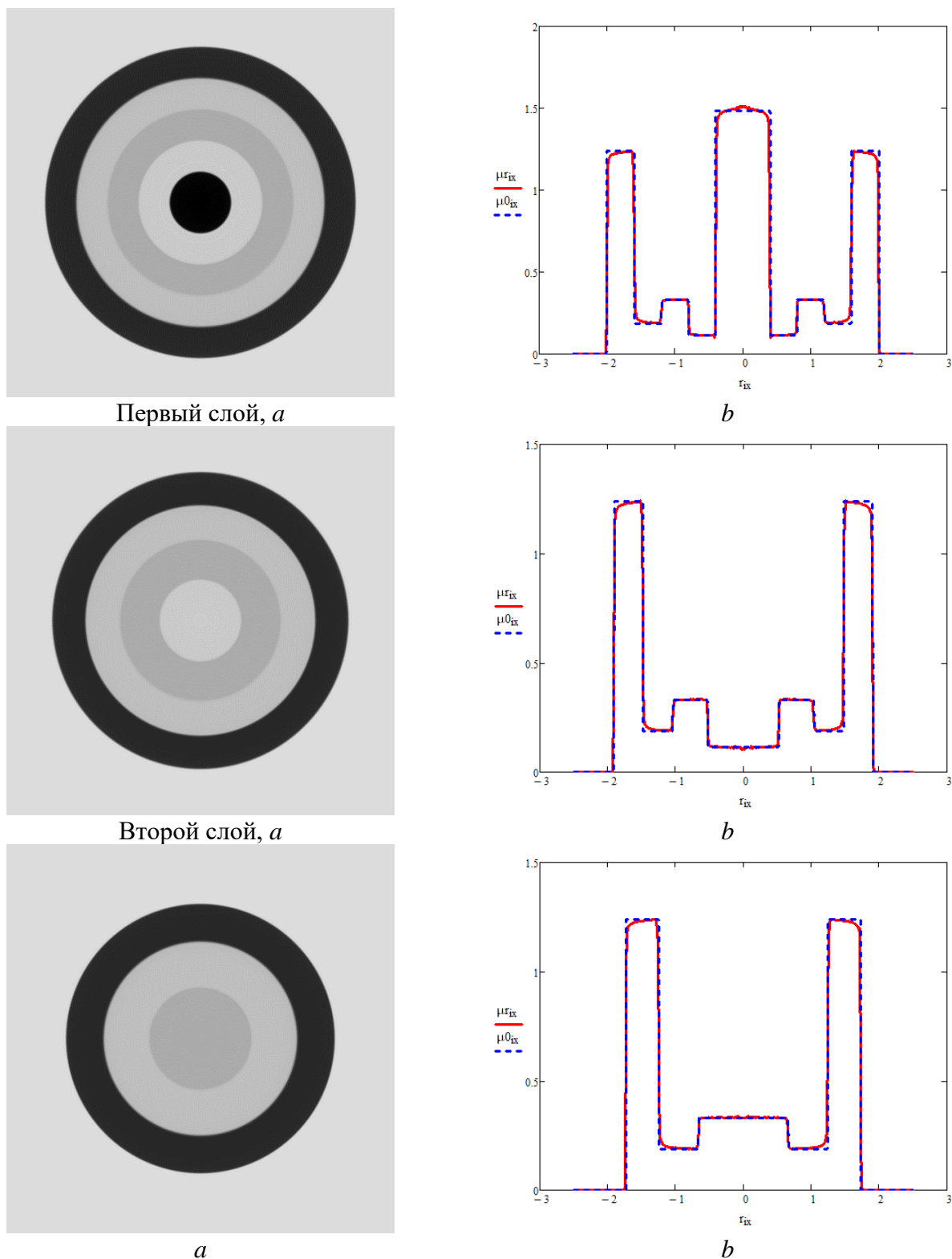


Рисунок 11 — Визуализация артефакта ужесточения пучка излучения для сечений шара, медный фильтр толщиной 10 мм: a — изображение сечения; b — радиальное распределение реконструкции $\mu r(r)$ и реальное радиальное распределение $\mu 0(r)$

Сравнение данных, приведённых на рисунках 10 и 11 свидетельствуют об эффективности увеличения толщины фильтра РИ. Эффект ужесточения РИ приводит к снижению влияния исследуемого артефакта на качество реконструкции. Отметим, что интенсивность потока в рассматриваемом случае уменьшается в несколько раз. Положительный момент связан с возможностью высокоточной оценки распределения плотности по сечению ОК.

5.3.2 Энергетический спектр с учётом характеристического излучения

Энергетический спектр ИРИ складывается из непрерывной и дискретной составляющих. Дискретная составляющая обуславливается процессом образования характеристического излучения в материале мишени.

Для вольфрама при расчётах, как правило, в качестве энергии характеристического излучения используют линию $E_{\chi}=59,3$ кэВ [113]. Принято считать, что вклад характеристического излучения α_{χ} для максимальных энергий от 150 до 300 кэВ не превосходит 10 % [114, 115]. Для примера возьмём реалистичную величину [114] $\alpha_{\chi}=5$ %.

На рисунке 12 приведены результаты моделирования проекций и реконструкции изображений центрального сечения для рассматриваемого примера ОК с учётом характеристического рассеяния для $h_f=10$ мм.

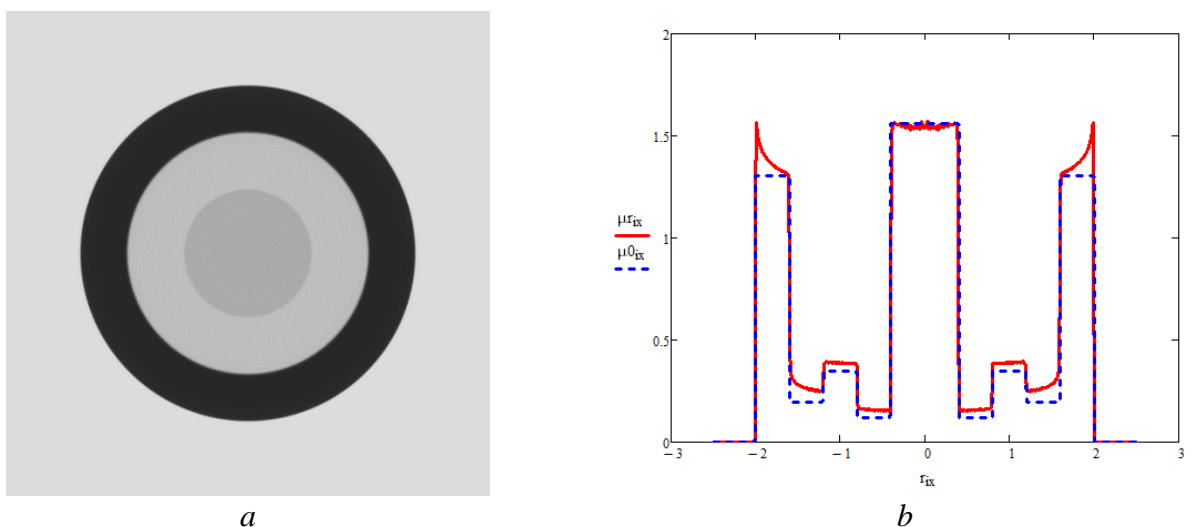


Рисунок 12 — Визуализация артефакта ужесточения пучка излучения с учётом характеристического излучения для сечений шара, медный фильтр толщиной 10 мм: a — изображение сечения; b — радиальное распределение реконструкции $\mu r(r)$ и реальное радиальное распределение $\mu 0(r)$

Из сопоставления графиков на рисунках 10—12 следует, что применение достаточно жёсткой фильтрации первичного излучения не в полной мере устраняет артефакт ужесточения пучка рентгеновского излучения с дискретными линиями.

Из анализа результатов моделирования артефактов ужесточения пучка рентгеновского излучения и наличия в интегральном потоке регистрируемого рентгеновского излучения фотонов, рассеявшихся в объекте контроля, следует сделать вывод о работоспособности разработанных математических моделей, алгоритмов и реализующих их программ, написанных в системе для математических вычислений MathCad, применительно к исследованию влияния отмеченных артефактов на качество реконструкции изображений сечений объектов с осевой симметрией.

Учёт других артефактов физической и технической природы возможен после внесения в отмеченные модели, алгоритмы и программы соответствующих блоков, что не меняет общую идеологию подхода к исследованию артефактов.

6 Валидация имитационной модели оценки артефактов ужесточения пучка и рассеяния в компьютерной томографии

Валидация разработанной модели сводится к подтверждению близости модельных и экспериментальных оценок артефактов ужесточения пучка излучения и рассеяния.

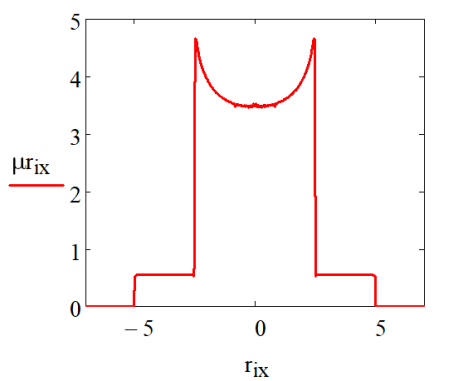
6.1 Сравнение модельных и экспериментальных оценок артефакта ужесточения пучка

В качестве основы для сравнения модельных и экспериментальных оценок артефактов ужесточения пучка были использованы результаты [76]. В указанной работе приведены экспериментальные распределения оценок ЛКО для двух объектов. Первый объект представляет собой куб из полиметилметакрилата (ПММА) размерами $10 \times 10 \times 10 \text{ мм}^3$ с симметрично расположенным внутри по центру цилиндром из алюминия радиусом 2,5 мм.

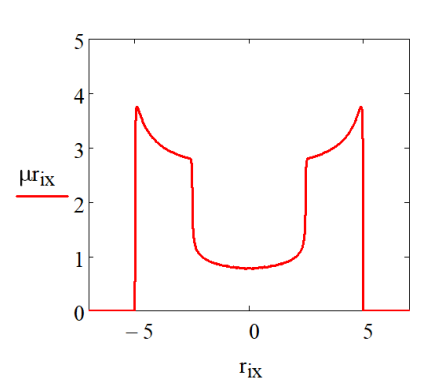
Второй объект сконструирован аналогично, но куб изготовлен из алюминия, а цилиндр из ПММА. В качестве источника фотонов использовался рентгеновский аппарат непрерывного действия с максимальной энергией $E_{\max}=50$ кэВ с мишенью из молибдена. Характеристическое излучение молибдена представлено линиями K_{α} и K_{β} с энергиями 17,5 кэВ и 19,6 кэВ соответственно. Толщина алюминиевого фильтра $h_f=2$ мм. Толщина чувствительного слоя детектора $h_d=0,45$ мм Si. Режим детектирования фотонов счётный с порогом 5 кэВ. Размер пикселя с учётом геометрического увеличения $a_d=b_d\approx 0,1$ мм.

При моделировании артефактов вместо внешнего куба [76] был использован цилиндр диаметром 10 мм и высотой 10 мм. На рисунке 13 приведены модельные оценки радиальных распределений $\mu r(r)$ для описанного выше примера для внешних цилиндров из алюминия и ПММА.

Сравнение распределений, приведённых на рисунке 13, с экспериментальными графиками из [76] подтверждает близость оценок распределений ЛКО, полученных экспериментально и методом имитационного моделирования. Расхождение между модельными и экспериментальными оценками пространственных распределений ЛКО в характерных точках графиков (локальные максимумы и минимумы) не превосходит 2,5 %. Такой точности моделирования вполне достаточно, так расхождение в оценках ЛКО для двух рассматриваемых объектов для алюминия 15 % и более, а для ПММА 30 % и более.



Цилиндр из ПММА с внутренним цилиндром из Al



Цилиндр из Al с внутренним цилиндром из ПММА

Рисунок 13 — Модельные оценки радиальных распределений $\mu r(r)$ для примера из [32] для центральных сечений исследуемых объектов.

Время формирования и обработки пяти проекций не превосходит 2-3 минут, что свидетельствует о высокой производительности MathCad-программы, написанной на основе разработанной имитационной модели.

6.2 Сравнение модельных и экспериментальных оценок артефакта рассеяния

Для проверки эффективности разработанной имитационной модели применительно к оценке артефакта рассеяния в КТ был проведён эксперимент по сканированию стального шара диаметром 33,3 мм. Эксперимент проводится на системе микро-КТ с коническим пучком. Система разработана в Томском политехническом университете и состоит из рентгеновского аппарата (Comet, Швейцария) с фокусным пятном 1 мм, 16-битного TFT-детектора (Perkin Elmer, США) и вращающегося стола. Радиационно-оптический преобразователь представляет собой экран из столбчатых кристаллов CsI. Эксперименты проводились для РИ с максимальной энергией $E_{\max}=400$ кэВ. Излучение фильтровали медной пластиной толщиной $h_f=4$ мм.

На рисунке 14 приведена 2D проекция стального шара и результаты оценки радиального распределения ЛКО центрального сечения ОК. При моделировании был использован подход к оценке факторов накопления гамма-излучения из работы [116]. Предварительный анализ проекций показал наличие мощного источника вторичного фотонного излучения с неоднородным полем. Указанное поле фотонов формируется рассеянием излучения от элементов томографа и вспомогательных конструкций. С подобными сложностями в интерпретации артефактов в КТ сталкивались многие исследователи, например, [117]. В нашем случае присутствует аддитивная составляющая с ярко выраженной неоднородностью в центре. Отмеченное поле в первом приближении удалось представить в виде точеного изотропного источника излучения, ослабленного структурой с круглым сечением. Радиальное распределение интенсивности вторичного излучения выглядит аналогично

распределению из работы [117]. Характеристики поля вторичного излучения оценивались методом невязки.

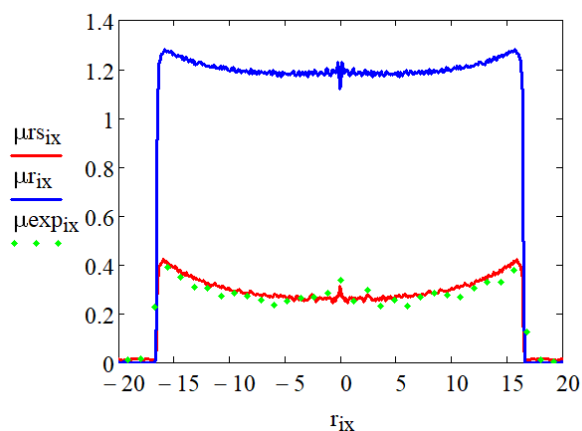
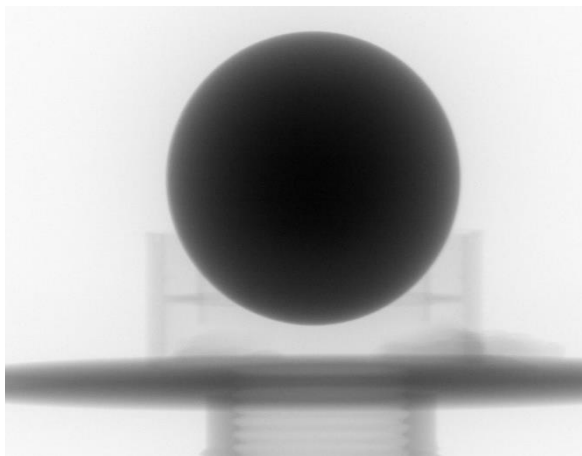


Рисунок 14 — 2D проекция стального шара диаметром 33,3 мм и оценки радиальных распределений ЛКО для центрального горизонтального сечения:

— модельное без рассеянного излучения $\mu_r(r)$; — модельное с рассеянным излучением $\mu_{rs}(r)$; ♦ — экспериментальное.

Анализ приведённых графиков подтверждает вывод о необходимости компенсации артефакта рассеяния [117], причём необходимо учитывать все объекты рассеяния, а не только ОК. Близость модельных и экспериментальных радиальных зависимостей ЛКО свидетельствует об эффективности оценки артефакта рассеяния с помощью предложенной имитационной модели и соответствующей ей программы.

Заключение

Адаптирована математическая модель формирования и обработки синограмм в рентгеновской компьютерной томографии с учётом ужесточения пучка рентгеновского излучения и вклада фотонов, испытавших рассеяние в объекте контроля, в интегральный поток рентгеновского излучения применительно к неоднородным объектам с осевой симметрией. Адаптированная модель реализована в виде программ в системе математических вычислений в MathCad. Был проведён ряд вычислительных экспериментов для многослойных неоднородных объектов в форме шара. Сравнение результатов симуляции и результатов натурных экспериментов, имеющихся в научной литературе, подтвердило работоспособность предложенных моделей и программ применительно к исследованию осесимметричных неоднородных объектов методом рентгеновской компьютерной томографии. Математическая модель и программы, её реализующие, могут быть использованы на стадии проектирования систем рентгеновской компьютерной томографии не только с целью оценки уровней артефактов, но и выбора параметров предварительного фильтра, максимальной энергии рентгеновского излучения и степени коллимации излучения.

7 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

7.1 Оценка делового потенциала и перспектив для исследований с точки зрения ресурсоэффективности

Технология QuaD используется для измерения производительности, используется для описания качества проектов, и перспективы могут быть использованы для определения целесообразности инвестирования в исследовательские проекты.

Технология QuaD на основе средневзвешенного из следующих наборов показателей:

Для того чтобы сравнить конкурентоспособность термогравиметрического анализа, был выбран с помощью сканирующего электронного микроскопа. В таблице 1 перечислены выбранные показатели, используемые для оценки конкурентоспособности метода

Таблица 1 — Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение (3/4)	Средневзвешенное значение (5x2)
1	2	3	4	5	6
Показатели оценки качества разработки					
1. Повышение производительности труда	0,5	100	100	1	0,5
2. Простота эксплуатации	0,2	95	100	0,95	0,19
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
3. Цена	0,3	30	100	0,3	0,09
4. Финансовая эффективность научной разработки	0,1	60	100	0,6	0,6
Итого	1				

Оценка качества и перспективности по технологии QuaD определяется по формуле:

$$\Pi_{cp} = \sum_i B_i \cdot B_i, \quad (23)$$

где P_{cp} — средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки;

B_i — вес показателя (в долях единицы);

B_i — средневзвешенное значение i -го показателя.

$$P_{cp} = 0,5 \cdot 100 + 0,2 \cdot 95 + 0,3 \cdot 30 + 0,1 \cdot 60 = 84$$

Показатель P_{cp} равный 84 говорит о том, что перспективность разработки считается выше средней и поэтому ее следует развивать.

7.2 План исследования

7.2.1 Структура работы

План выполняется в следующем порядке: определить структуру работы, определить участников работы, организовать и распределить рабочее время, установить график исследований для каждого человека.

В процессе исследования необходимо создать рабочую группу, в которую войдут руководители и студенты университета, ответственные за исследования.

В этом разделе мы изучим этап подготовки и список работ, цель — выделить время и персонал в соответствии с типом работы (таблица 2).

Таблица 2 — Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Студент
	3	Выбор направления исследований	Руководитель
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, лаборант
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Подготовка образцов для экспериментов	Лаборант, студент
	6	Проведение экспериментов	Лаборант, студент
Обобщение и оценка результатов	7	Расшифровка данных и сравнение с имеющимися показателями	Лаборант, студент
Оформления отчета по НИР	8	Составление пояснительной записки	Руководитель, лаборант, студент

7.2.2 Определить сложность работы

В большинстве случаев затраты на рабочую силу будут составлять большую часть затрат на разработку, поэтому важно определить сложность исследовательской работы участников.

Научные исследования сложны и вероятностны. Это зависит от многих сложных факторов. Чтобы определить ожидаемую (среднюю) стоимость затрат труда, можно использовать следующую формулу:

$$t_{\text{ож}} = \frac{3 \cdot t_{\text{min } i} + 2 \cdot t_{\text{max } i}}{5}, \quad (24)$$

Исходя из ожидаемой сложности работы, мы сделали предположения и решили, что работа должна выполняться несколькими людьми в разное время, а продолжительность каждой работы была определена как T_{pi} дней. Поскольку заработная плата составляет около 65% от общей предполагаемой стоимости научных исследований, этот расчет необходим для разумного расчета заработной платы.

$$T_{pi} = \frac{t_{\text{ож } i}}{C_i} \quad (25)$$

7.2.3 Установить график научных исследований

В заключительной диссертации студенты являются не только собственно «студентами», но и научными сотрудниками.

Разработаем график научных исследований наиболее понятным и интуитивно понятным методом.

Диаграмма Ганта — горизонтальная гистограмма, работы по теме являются временным редактированием, и следует отметить начало и конец этих работ:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (26)$$

где T_{ki} — продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} — продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ — коэффициент календарности.

Коэффициент календарности $k_{\text{кал}}$ определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} . \quad (27)$$

После подстановки данных получим

$$k_{\text{кал}} = \frac{366}{366 - 104 - 14} \approx 1,48 .$$

Рассчитанные значения в календарных днях по каждому виду работ T_{ki} округляем до целого числа. Все результаты расчётов сводим в таблицу 3.

Таблица 3 — Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ						Исполнители	Длительность работ в рабочих днях, T_{pi}	Длительность работ в календарных днях, T_{ki}							
	t_{\min} , чел- дни			t_{\max} , чел- дни						$t_{\text{ож}}$, чел- дни						
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3				Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3				
Составление и утверждение технического задания	1	1	1	3	3	3	1,8	1,8	1,8	Руковод.	2	2	2	3	3	3
Подбор и изучение материалов по теме	5	5	5	9	9	9	6,6	6,6	6,6	Студ.	7	7	7	10	10	10
Выбор направления исследований	4	4	4	6	6	6	4,8	4,8	4,8	Руковод.	5	5	5	7	7	7
Календарное планирование работ по теме	2	2	2	4	4	4	2,8	2,8	2,8	Руковод. лабор.	2	2	2	3	3	3
Подготовка образцов для экспериментов	2	2	2	4	4	4	4,8	4,8	4,8	Лабор. студ.	3	3	2	4	4	4
Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов	2	3	5	4	6	8	2,8	4,2	6,2	Лабор. студ.	2	3	4	3	4	6
Расшифровка данных и сравнение с имеющимися показателями	3	3	3	5	5	5	3,8	3,8	3,8	Лабор. студ.	2	2	2	3	3	3
Составление пояснительной записки	5	5	5	7	7	7	5,8	5,8	5,8	Руковод. лабор. студ.	2	2	2	3	3	3

На основе таблицы 3 строим календарный план график проведения НИР по теме исследований (таблица 4).

Таблица 4 — Календарный план график проведения НИР по теме

№ работ	Вид работ	Исполнители	T _{кi} , кал. дни	Продолжительность выполнения работ								
				Фев.		Март			Апрель			
				2	3	1	2	3	1	2	3	
1	Составление ТЗ	Руковод.	3	<div></div>								
2	Изучение материалов	Студ.	10	<div></div>								
3	Выбор направления	Руковод.	7	<div></div>	<div></div>							
4	Планирование работ	Руковод. лабор.	3			<div></div>						
5	Подготовка образцов	Лабор. студ.	4				<div></div>					
6	Проведение экспериментов	Лабор. студ.	6					<div></div>				
7	Расшифровка данных	Лабор. студ.	3						<div></div>			
8	Пояснительная записка	Руковод. лабор. студ.	15							<div></div>	<div></div>	

■ — руководитель, ■ — студент, ■ — лаборант

7.3 Исследования и разработки бюджета

7.3.1 Расчет стоимости материала НТИ

В эту статью включена стоимость всех материалов, использованных при разработке проекта:

Стоимость материала рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m (C_i + N_{\text{расх } i}), \quad (28)$$

где m — количество видов материальных ресурсов, потребляемых научными исследованиями;

$N_{\text{расх } i}$ —материальные ресурсы класса i (шт, кг, м, м² и т.д.), которые планируется использовать при проведении научных исследований;

C_i — цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T — фактор, учитывающий транспортные и закупочные расходы.

В таблице 5 перечислены материальные затраты, необходимые для НИР.

Таблица 5 — Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество			Цена за ед., руб.			Затраты на материалы (З _м), руб.		
		Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Бумага	Лист	100	100	100	1,2	1,2	1,2	138	138	138
Картридж для принтера	Шт.	1	1		1000	1000		1150	1150	1150
Итого								1288	1288	1288

7.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

Стоимость (экспериментального) специального оборудования для расчетных работ, учтённого в данной статье, включает все расходы, связанные с приобретением специального оборудования (инструменты, кронштейны, оборудование и изображения).

Сложившаяся ситуация будет определять стоимость спецтехники, а в некоторых случаях цена зависит от цены доставки. Далее рассмотрим стоимость оборудования, доступного для научно-технических организаций. (таблица 6.)

Таблица 6 — Расчет бюджета затрат на приобретение оборудования для НИР

№ п/п	Наименование оборудования	Количество единиц оборудования			Цена единицы оборудования, тыс. руб.			Общая стоимость оборудования, тыс. руб.		
		Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1	Сканер Microtek Medi-5000	1	0	0	100	0	0	100	0	0
2	Негатоскоп Н-85/220	1	1	1	38	38	38	38	38	38
3	Сканер Microtek Medi-3200	0	1	0	0	434,25	0	0	434,25	0
4	Персональный компьютер	1	1	1	20	20	20	20	20	20
5	Сканер EPSON EXPRESSION 10000XL	0	0	1	0	0	675,5	0	0	675,5
Итого								158	492,25	733

В смете затрат оборудование учитывается по амортизации. Примем средневзвешенную норму амортизации 10%, тогда величина амортизации для Исполнения $i=1..3$ находится следующим образом

$$A_1 = \frac{158 \cdot 0,1}{365} \cdot 20 = 0,866 \text{ тыс. руб.}, A_2 = \frac{492,25 \cdot 0,1}{365} \cdot 20 = 2,697 \text{ тыс. руб.},$$

$$A_3 = \frac{733 \cdot 0,1}{365} \cdot 20 = 4,016 \text{ тыс. руб.}$$

7.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

Эта статья включает в себя базовые оклады с участием научных и инженерно-технического персонала, а также опытных мастерских и опытных производств 20—30% от месячной заработной платы.

Расчет основной заработной платы сводится в таблицу 7.

Таблица 7 — Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудоемкость, чел.-дн.			Зарплата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс. руб.			Всего заработная плата по тарифу(окладам), тыс. руб.		
			Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1	Составление и утверждение технического задания	Руковод.	2	2	2	1,884	1,884	1,884	3,768	3,768	3,768
2	Подбор и изучение материалов по теме	Студент	7	7	7	0,692	0,692	0,692	4,844	4,844	4,844
3	Выбор направления исследований	Руковод.	5	5	5	1,884	1,884	1,884	9,420	9,420	9,420
4	Календарное планирование работ по теме	Руковод., лаборант	2	2	2	2,581	2,581	2,581	5,162	5,162	5,162
5	Подготовка образцов для экспериментов	Лаборант, студент	3	3	3	1,389	1,389	1,389	2,082	2,082	2, 778

Окончание таблицы 9

№ п/п	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудоемкость, чел.-дн.			Заработная плата, приходящаяся на один чел.- дн., тыс. руб.			Всего заработная плата по тарифу(окладам), тыс. руб.		
			Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
6	Проведение экспериментов	Лаборант, студент	2	3	4	1,389	1,389	1,389	2, 778	4,167	5,556
7	Расшифровка данных и сравнение с имеющимися показателями	Лаборант, студент	2	2	2	1,389	1,389	1,389	2, 778	2, 778	2, 778
8	Составление пояснительной записки	Руковод., лаборант, студент	2	2	2	3,273	3,273	3,273	6, 546	6, 546	6, 546
Итого									61,414	62,803	64,192

Кроме того, он включает в себя дополнительную оплату и дополнительную заработную плату:

$$З_{\text{зп}} = З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}, \quad (29)$$

где $З_{\text{осн}}$ — основная заработная плата;

$З_{\text{доп}}$ — дополнительная заработная плата (12-20 % от $З_{\text{осн}}$).

Основная заработная плата ($З_{\text{осн}}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{\text{осн}} = T_p \cdot З_{\text{дн}}, \quad (30)$$

где $З_{\text{осн}}$ — основная заработная плата одного работника;

T_p — продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. ;

$З_{\text{дн}}$ — среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} \quad (31)$$

где $Z_{\text{м}}$ — месячный должностной оклад работника, руб.;

$F_{\text{д}}$ — действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Баланс рабочего времени сведён в таблицу 8.

Таблица 8 — Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Лаборант	Студент
Календарное число дней	366	366	366
Количество нерабочих дней — выходные — праздничные	66	66	66
Потери рабочего времени — отпуск — невыходы по болезни	48	48	72
Действительный годовой фонд рабочего времени	252	252	228

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot k_{\text{р}}, \quad (32)$$

где $Z_{\text{тс}}$ — заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{\text{р}}$ — районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

В таблице 9 приведены результаты расчёта основной заработной платы

Таблица 9 — Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{\text{тс}}$, руб.	$k_{\text{р}}$	$Z_{\text{м}}$, тыс. руб.	$Z_{\text{дн}}$, тыс. руб.	$T_{\text{р}}$, раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$, тыс. руб.
Руководитель	35120	1,3	45656	1,884	16	30,144
Лаборант	13000	1,3	16900	0.697	26	18,122
Студент	12130	1,3	15769	0.692	19	13,148
ИТОГО						61,414

7.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые пожертвования)

В этой статье отражены отчисления во внебюджетные фонды (страховые пожертвования) (таблица 10).

Определите отличную оценку внебюджетных средств на основе следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}), \quad (33)$$

где $k_{внеб}$ — коэффициент перекрытия внебюджетных фондов составляет 30,2%

Таблица 10 — Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, тыс. руб		
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
	61,414	62,803	64,192
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,302		
Итого			
Исполнение 1	18,547		
Исполнение 2	18,966		
Исполнение 3	19,385		

7.3.5 Бюджетный исследовательский проект

Ориентировочная стоимость исследовательской работы (темы) является результатом бюджета проекта (таблица 11).

Таблица 11 — Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, тыс.руб.		
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1. Материальные затраты	1,288	1,288	1,288
2. Амортизация	0,86	2,68	4
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	61,414	62,803	64,192
4. Отчисления во внебюджетные фонды	18,547	18,966	19,385
5. Накладные расходы	13,13	13,71	14,21
6. Бюджет затрат	95,23	99,44	103,08

7.4 Определение ресурсов (экономика ресурсов), финансов, бюджета, социального и экономического равенства

Определение эффективности основано на расчете общего индекса эффективности исследований.

Оценка результатов проводится с использованием общих показателей финансовой эффективности научных исследований, что позволяет получить общие показатели выполнения технических задач

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}i} = \frac{\Phi_{\text{р}i}}{\Phi_{\text{max}}} . \quad (34)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп}i}$ — интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{\text{р}i}$ — стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} — максимальная стоимость исполнения научно- исследовательского проекта.

Полученное значение учитывает временные затраты (значение больше единицы) или зависит от количества единиц измерения (разница между единицами, но больше нуля).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{\text{р}i} = \sum_i a_i \cdot b_i , \quad (35)$$

где $I_{\text{р}i}$ — общий показатель ресурсоэффективности i -го плана развития;

a_i — весовой коэффициент развития варианта;

b_i — точная оценка i -го проекта развития устанавливается экспертами на основе выбранной шкалы оценки.

В таблице 12 приведена сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта.

Таблица 12 — Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1.Повышение производительности труда	0,5	5	5	5
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,2	5	5	5
3. Цена	0,3	5	4	3
4.Финансовая эффективность научной разработки	0,1	5	5	5
Итого	1			

$$I_{\text{р}1} = 5 \cdot 0,5 + 5 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,3 + 5 \cdot 0,1 = 4,9$$

$$I_{p2} = 5 \cdot 0,5 + 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,3 + 5 \cdot 0,1 = 5,2$$

$$I_{p2} = 5 \cdot 0,5 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,3 + 5 \cdot 0,1 = 5,5.$$

С помощью формулы на основе комплексного индекса эффективности использования ресурсов и комплексного финансового индекса можно определить комплексный индекс эффективности плана развития:

$$I_{\text{исп}i} = \frac{I_{pi}}{I_{\text{фин}p}}, i = 1, 2, 3, \dots$$

Комплексные показатели программы разработки сравнения стволов могут определять относительную эффективность проекта, и в то же время наиболее подходящая программа может быть выбрана из предложенных программ.

Сравнительная эффективность проекта ($\mathcal{E}_{\text{ср}}$):

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп}1}}{I_{\text{исп}2}} \quad (36)$$

В таблице 13 сравнительная эффективность разработки.

Таблица 13 — Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,386	0,74	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	5,0	4,7	4,4
3	Интегральный показатель эффективности	12,95	6,35	4,4
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	2,94/2,04	0,49/1,44	0,69/0,34

После расчета эффективности использования энергии и ресурсов и сравнения различных конструкций мы пришли к выводу, что в первую очередь производительность является наиболее прибыльной.

8. Социальная ответственность

Социальная ответственность — ответственность отдельного ученого и научного сообщества перед обществом. Первостепенное значение при этом имеет безопасность применения технологий, которые создаются на основе достижений науки, предотвращение или минимизация возможных негативных последствий их применения, обеспечение безопасного как для испытуемых, как и для окружающей среды проведения исследований.

Выпускная квалификационная работа посвящена разработке измерителя эксцентricности электрического кабеля.

В процессе работы проводились подбор лазера с нужными характеристиками, подбор линз для получения интерференционной картины.

Также в исследовании проводились работы с монтажом печатной платы измерителя, что связано с химическим воздействием токсичных металлов, содержащихся в припое, таких как свинец, цинк. Может произойти образование кожной аллергии в результате воздействия растворителей, канифоли, содержащихся во флюсах.

8.1 Производственная безопасность

К вредным факторам производственной среды, наблюдаемым в лаборатории, относятся отклонение показателей микроклимата от нормативных значений, повышенный уровень электромагнитного излучения, высокий уровень напряженности электрического и магнитного полей, создаваемыми приборами, подключаемыми к сети электрического тока, недостаточный уровень освещенности в помещении.

8.2 Отклонение показателей микроклимата в помещении

Состояние внутренней среды замкнутого пространства, помещений, которое оказывает влияние на человека, называется микроклиматом. Микроклимат характеризуется показателями температуры воздуха в помещении, температурой конструкций, влажностью воздуха, а также интенсивностью теплового облучения.

Отклонение показателей микроклимата оказывает воздействие на работоспособность и здоровье персонала. В случаях понижения температуры окружающего воздуха на рабочем месте наблюдается рост теплоотдачи от организма человека за счет теплопроводности, излучения и конвекции. При грубых нарушениях норм и сильном понижении температуры окружающего воздуха происходит переохлаждение организма.

Параметры микроклимата регулирует СанПиН 2.2.4.548–96. Постановление устанавливает, в зависимости от периода года и категории выполняемых работ, оптимальные и допустимые нормы параметров микроклимата (таблица 14 и 15).

Таблица 14 — Оптимальные нормы микроклимата

Период года	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	19—22	40—60	0,1
Теплый	23—25		0,1

Таблица 15 — Допустимые нормы микроклимата

Период года	Температура воздуха, °С		Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
	Нижняя допустимая граница	Верхняя допустимая граница		
Холодный	15	25	20—80	<0,5
Теплый	22	28	20—80	<0,5

Температура в теплый период года 23—25°С, в холодный период года 20—4°С, относительная влажность воздуха 50—60%, скорость движения воздуха 0,1 м/с.

Согласно результатам исследования микроклимата рабочего помещения, можно сделать вывод о том, что он полностью отвечает нормам (СанПиН 2.2.4.548 — 96).

8.3 Превышение уровней шума

Звуковые колебания — это одна из важных физических характеристик рабочего места, которая оказывает серьезное влияние на самочувствие сотрудника и его работоспособность, а в более длительной перспективе — и на

общее состояние здоровья. Человеческим организмом в качестве шума воспринимается любой неблагоприятно воспринимаемый звук. Наиболее распространенным источником шума на рабочем месте является работающее оборудование, а именно персональные компьютеры, прочая оргтехника, работающие источники искусственного освещения. Побочным источником шума также может быть вентиляционная и охладительная система, проходящая рядом автомобильная дорога, производимые строительные работы.

ГОСТ 12.1.003—83 «Шум. Общие требования безопасности», определяющий основные требования к ограничению уровня шума на рабочих местах.

К мероприятиям, нейтрализующим негативное воздействие шума, следует отнести:

- подбор оборудования с наименьшими шумовыми характеристиками;
- анализ производимой деятельности и обучение персонала таким режимам и методам работы, которые способны предотвратить высокий уровень шума;
- обязательное использование технических средств, обеспечивающих защиту от шума (изоляция, звукопоглощающие покрытия, амортизация, кожухи и защитные экраны);
- ограничение интенсивности и продолжительности воздействия шума до приемлемого уровня;
- применение средств индивидуальной защиты органов слуха;
- если персонал подвержен воздействию шума выше 82 дБ, обязательным условием является проведение ежегодных медицинских осмотров.

В случаях превышения допустимого уровня шума, предусматривается применение средств индивидуальной и коллективной защиты.

К средствам индивидуальной защиты органов слуха, согласно ГОСТ 12.4.011—89, относятся противοшумные шлемы, заглушки, вкладыши, наушники, а также специальные костюмы.

Средства коллективной защиты:

- ослабление или устранение причин шума в источнике образования;
применение средств звуко- и виброизоляции, звуко- и вибропоглощения для изоляции источников шума, изготовленные из керамзита, микропористой резины, шамотного кирпича;
- использование различных средств, способствующих снижению вибрации и шума на пути распространения.

Согласно СанПиН 2.2.2 / 2.4.1340-03, при выполнении основных работ на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 82 дБА. Для учебной аудитории свойственен шум до 45 дБ. На рабочем месте уровень шума не превышает предельного значения, что говорит о соответствии требованиям норм.

8.4 Повышенный уровень электромагнитных излучений

Источником электромагнитных излучений в нашем случае являются дисплеи ПЭВМ. Монитор компьютера включает в себя излучения рентгеновской, ультрафиолетовой и инфракрасной области, а также широкий диапазон электромагнитных волн других частот. Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 напряженность электромагнитного поля по электрической составляющей на расстоянии 50 см вокруг ВДТ не должна превышать 25В/м в диапазоне от 5Гц до 2кГц, 2,5В/м в диапазоне от 2 до 400 кГц .

Длительная работа в зоне повышенного электромагнитного излучения, в том числе за компьютером, вызывает усталость, головную боль и в крайних случаях тошноту, т.е. оказывает вредное воздействие. Превышение нормативных значений излучения влечет за собой следующие проблемы: развитие трудноизлечимых болезней, повреждение центральной нервной системы и мозга, сердечно-сосудистой системы. При облучении глаз наблюдается развитие катаракты и помутнение хрусталика. Длительная работа за компьютером негативно сказывается на психическом здоровье человека и вызывает раздражительность.

Электромагнитное излучение от компьютера генерируется всеми частями данного устройства. Процессор, например, производит низкочастотное излучение, которое распространяется в окружающем пространстве в виде электромагнитных волн, дезориентирующих и ухудшающих работу биомагнитного поля человеческого тела.

Предельно допустимые уровни облучения (по ОСТ 54 30013-83):

- а) до 10 мкВт/см^2 , время работы (8 часов);
- б) от 10 до 100 мкВт/см^2 , время работы не более 2 часов;
- в) от 100 до 1000 мкВт/см^2 , время работы не более 20 мин. при условии пользования защитными очками;
- г) для населения в целом ППМ не должен превышать 1 мкВт/см^2 .

Существует ряд советов, следуя которым можно уменьшить негативное влияние или даже нивелировать некоторые последствия такого взаимодействия. Защита человека от опасного воздействия электромагнитного излучения осуществляется применением средств коллективной и индивидуальной защиты.

Средства коллективной защиты:

- защита временем;
- защита расстоянием;
- снижение интенсивности излучения непосредственно в самом источнике излучения;
- экранирование источника или рабочих мест, осуществляется с помощью заземленных металлических экранов (железо, сталь, медь, латунь);
- защита рабочего места от излучения.

К средствам индивидуальной защиты относятся очки и специальная одежда, выполненная из металлизированной ткани (кольчуга). При этом следует отметить, что использование СИЗ возможно при кратковременных работах и является мерой аварийного характера. Ежедневная защита обслуживающего персонала должна обеспечиваться другими средствами. Вместо обычных стекол используют стекла, покрытые тонким слоем золота или диоксида олова (SnO_2).

8.5 Поражение электрическим током

Для повышения эффективности электробезопасности была разработана система классификации помещений по степени опасности. В соответствии с действующими нормами (см. ПУЭ п. 1.1.13) все виды помещений (бытовые, производственные, административные и т.д.) разделяют на три группы.

Все помещения делятся по степени поражения людей электрическим током на три класса: без повышенной опасности, с повышенной опасностью, особо опасные. В нашем случае рабочее помещение относится к **первому классу электроопасности** (без повышенной опасности), так как соответствует следующим условиям:

- Низкая влажность, как правило, не превышающая 80,0%.
- Покрытие пола выполнено только из диэлектрических материалов (дерево, паркет, ламинат). Исключаются земляные, железобетонные и металлические полы.
- Температура воздуха до 35,0°C.
- Отсутствует выделение технологической пыли.
- В воздухе не присутствуют химически активные вещества.
- Оборудование рассчитано на подключение к сети до 1000 В.
- Допускается наличие климатических систем, включая вентиляцию и отопление.

Безопасными номиналами являются:

$$I < 0,1 \text{ А}; U < (6—36) \text{ В}; R_{\text{зазем}} < 4 \text{ Ом}.$$

Электробезопасность и допустимые нормы регламентируются Правилами устройства электроустановок (ПУЭ), ГОСТ 12.1.038-82 и ГОСТ 12.1.019-2009 ССБТ. В учебной аудитории источниками опасности могут быть как электрические сети, так и вычислительная техника.

С целью обеспечения электробезопасности при работе с персональными компьютерами предусмотрено выполнение ряда требований:

- все узлы ПК и подключенного к нему оборудования должны запитываться от одной фазы электрической сети;

— обеспечивается радиальное заземление с одной общей точкой для корпусов системного блока и внешних устройств;

— аварийное отключение компьютера и подключенных к нему устройств обеспечивается подключением к отдельному щиту с общим рубильником и автоматами защиты.

Лаборатория признана сухим помещением с нормальной температурой воздуха, оборудование рассчитано на подключение к сети до 1000 В (220 В), поэтому относится к первому классу электробезопасности.

Обеспечение электробезопасности, согласно ГОСТ 12.4.011—89, осуществляется применением следующих средств защиты от поражения электрическим током на рабочем месте.

Средства коллективной защиты:

- защитное заземление, зануление;
- малое напряжение;
- электрическое разделение сетей;
- защитное отключение;
- изоляция токоведущих частей;
- оградительные устройства.

Средства индивидуальной защиты:

- диэлектрические перчатки и боты;
- инструменты с изолирующими ручками;
- указатели напряжения;
- резиновые коврики.

8.6 Недостаточная освещённость рабочей зоны

Освещение рабочего места — важнейший фактор создания нормальных условий труда. Практически возникает необходимость освещения как естественным, так и искусственным светом. Первый случай характерен для светлого времени суток и при работе в помещениях, в которых имеются проемы в стенах и крыше здания, во втором случае применяются соответствующие осветительные установки искусственного света.

Согласно ГОСТ Р 55710-2013 в компьютерном классе учебного заведения освещенность при системе общего освещения не должна быть ниже 300 лк.

На рабочей поверхности должны отсутствовать резкие тени, которые создают неравномерное распределение поверхностей с различной яркостью в поле зрения, искажает размеры и формы объектов различия, в результате повышается утомляемость и снижается производительность труда.

Расчет освещенности рабочего помещения

В лаборатории проводятся работы средней точности IV, минимальная величина различия составляет от 0.5 до 1 мм. Согласно СП 52.1330.2011 необходимо создать искусственное освещение при системе общего освещения не ниже 200 лк, при системе комбинированного освещения не ниже 400 лк в соответствии с разрядом зрительной работы.

На рабочей поверхности должны отсутствовать резкие тени, которые создают неравномерное распределение поверхностей с различной яркостью в поле зрения, искажает размеры и формы объектов различия, в результате повышается утомляемость и снижается производительность труда.

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен. Длина помещения $A = 15$ м, ширина $B = 10$ м, высота = 4,5 м. Высота рабочей поверхности над полом $h_p = 1,0$ м. Согласно СНиП 23-05-95 необходимо создать освещенность не ниже 300 лк, в соответствии с разрядом зрительной работы.

Площадь помещения:

$$S = A \times B,$$

где A — длина, м;

B — ширина, м.

$$S = 15 \times 10 = 150 \text{ м}^2$$

Коэффициент отражения свежепобеленных стен с окнами, закрытыми шторами $\rho_{\text{П}}=70\%$. Свежепобеленного потолка $\rho_{\text{П}}=70\%$. Коэффициент запаса с люминисцентными лампами для помещения с малым выделением пыли $K_3 = 1,5$. Коэффициент неравномерности для люминисцентных ламп $Z = 1,1$.

В качестве источника света выбираем газоразрядную люминисцентную лампу дневной цветности ЛД-80, световой поток ФЛД которой равен 4250 лм. Т.к. данное лабораторное помещение обладает умеренной влажностью и запылением, а также хорошим отражением потолка и стен, то в качестве светильника выбираем открытые двухламповые типа ОД-2-80. Светильник имеет две лампы мощностью 80 Вт каждая, длина светильника равна 1531 мм, ширина — 266 мм.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина λ , которая для люминисцентных светильников с защитной решеткой лежит в диапазоне 1,1 — 1,3. Принимаем $\lambda=1,1$, расстояние светильников от перекрытия $h_c = 0,5$ м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = H - h_p - h_c$$

где H — высота помещения,

h_p — расстояние светильников от перекрытия,

h_c — высота рабочей поверхности над полом.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = H - h_p - h_c = 4,5 - 1 - 0,5 = 3 \text{ м}$$

Расстояние между соседними светильниками или рядами определяется по формуле:

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 3 = 3,3 \text{ м}$$

Число рядов светильников в помещении:

$$Nb = \frac{B}{L} = \frac{10}{3,3} = 3,03 \approx 3$$

Число светильников в ряду:

$$Na = \frac{A}{L} = \frac{15}{4,2} = 3,57 \approx 4$$

Общее число светильников:

$$N = 2 \cdot Nb \cdot Na = 2 \cdot 3 \cdot 4 = 24$$

Расчёт расстояния между соседними светильниками с учётом длины помещения и длины светильников:

$$3 \cdot L_1 + \frac{2}{3} \cdot L_1 + Na \cdot D = A$$

$$L_1 = \frac{3 \cdot (A - Na \cdot D)}{11} = \frac{3 \cdot (15000 - 4 \cdot 1531)}{11} = 2420 \text{ мм}$$

Расчёт расстояния от крайних светильников до стены с учётом длины помещения и длины светильников:

$$\frac{L_1}{3} = 807 \text{ мм}$$

Расчёт расстояния между соседними рядами с учётом ширины помещения и ширины светильников:

$$2 \cdot L_2 + \frac{2}{3} \cdot L_2 + Nb \cdot S = B$$

$$L_2 = \frac{3 \cdot (B - Nb \cdot S)}{8} = \frac{3 \cdot (10000 - 3 \cdot 266)}{8} = 3450 \text{ мм}$$

Расчёт расстояния от крайних рядов до стены с учётом ширины помещения и ширины светильников:

$$\frac{L_2}{3} = 1150 \text{ мм}$$

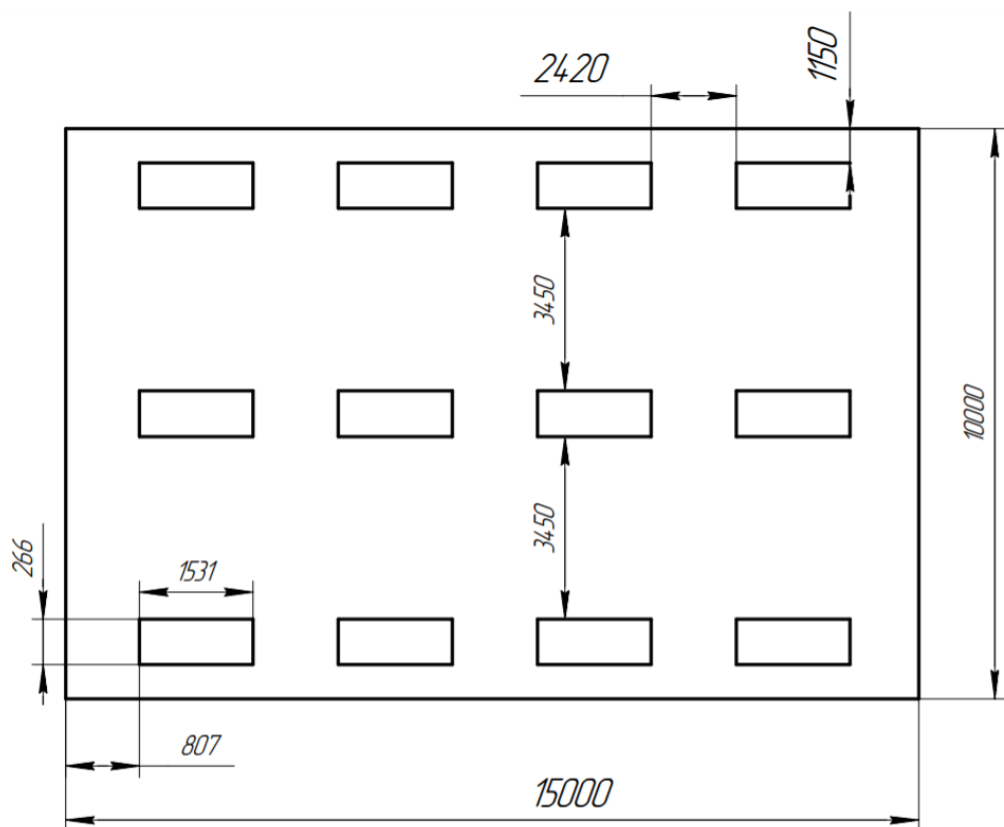


Рисунок 15 — План помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами

Индекс помещения:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{15 \cdot 10}{3 \cdot (15 + 10)} = 2$$

Коэффициент использования светового потока:

$$\eta = 0,6$$

Световой поток группы люминесцентных ламп:

$$\Phi = \frac{E \cdot A \cdot B \cdot K_z \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 15 \cdot 10 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{24 \cdot 0,6} = 3437,5 \text{ лм}$$

Проверка выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{ЛБ}} - \Phi}{\Phi_{\text{ЛБ}}} \cdot 100\% \leq 20\%$$

$$\frac{4250 - 3437,5}{4250} \cdot 100\% = 19,2\%$$

8.7 Пожарная опасность

По взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1-В4, Г и Д, а здания на категории А, Б, В, Г и Д.

Учебные лаборатории, и, в частности, компьютерные классы относят к категории В, так как в них присутствуют сгораемые твердые материалы и вещества (деревянные столы, шторы и стулья с тканевой обивкой).

Следует учитывать следующие меры пожарной безопасности:

- не загромождать эвакуационные пути и выходы посторонними предметами;
- не использовать неисправные электрические приборы;
- проводить регулярный инструктаж по технике безопасности;
- осуществлять отключение электрических приборов по завершению работы и не оставлять мусор на рабочем месте.

При ознакомлении с рабочим местом персоналу должны быть разъяснены правила пожарной безопасности. При возникновении возгорания следует немедленно прекратить работу и по возможности отключить электрооборудование, а также подать сигнал о пожаре, если не сработала система сигнализации при пожаре. Помимо эвакуации людей согласно плану эвакуации с этажа (рисунок 16), также необходимо предусмотреть меры сохранения материальных ценностей.

Если в компьютерном классе произошло локальное возгорание, следует обесточить электроприборы с помощью силового щита и воспользоваться огнетушителем. Обычно огнетушители, сопровождаемые инструкцией по применению, устанавливают в легкодоступном месте.

Как указывалось, ранее, в учебной аудитории присутствует ряд компьютеров, находящихся под напряжением, поэтому исключено применение огнетушителей с содержанием водных растворов пенообразующих добавок, наиболее предпочтительны углекислотные.

Наибольшее распространение получили следующие типы огнетушителей:

— углекислотные (ОУ—1, ОУ—2, ОУ—3 и т.д.), применяемые для обезвреживания возгораний различных горючих жидкостей и материалов, для тушения электроустановок напряжением до 1000 В при условии отключения электрооборудования;

— хладоновые (ОАХ, ОХ—3, СОТ—5М), предназначенные для тушения горючих и легковоспламеняющихся жидкостей, твердых веществ. Применяются для тушения электроустановок, находящихся под напряжением, если на поверхности не содержатся кислородосодержащие вещества и щелочные металлы;

— порошковые (П—2АП, ОП—5, ПФ, ПСБ—3) применяются для тушения электроустановок под напряжением до 1000 В.

— водные (ОХВП—10) предназначен для тушения пожаров (загораний) на начальной стадии твердых веществ и легковоспламеняющихся жидкостей, за исключением щелочных металлов и веществ, горение которых происходит без доступа воздуха.

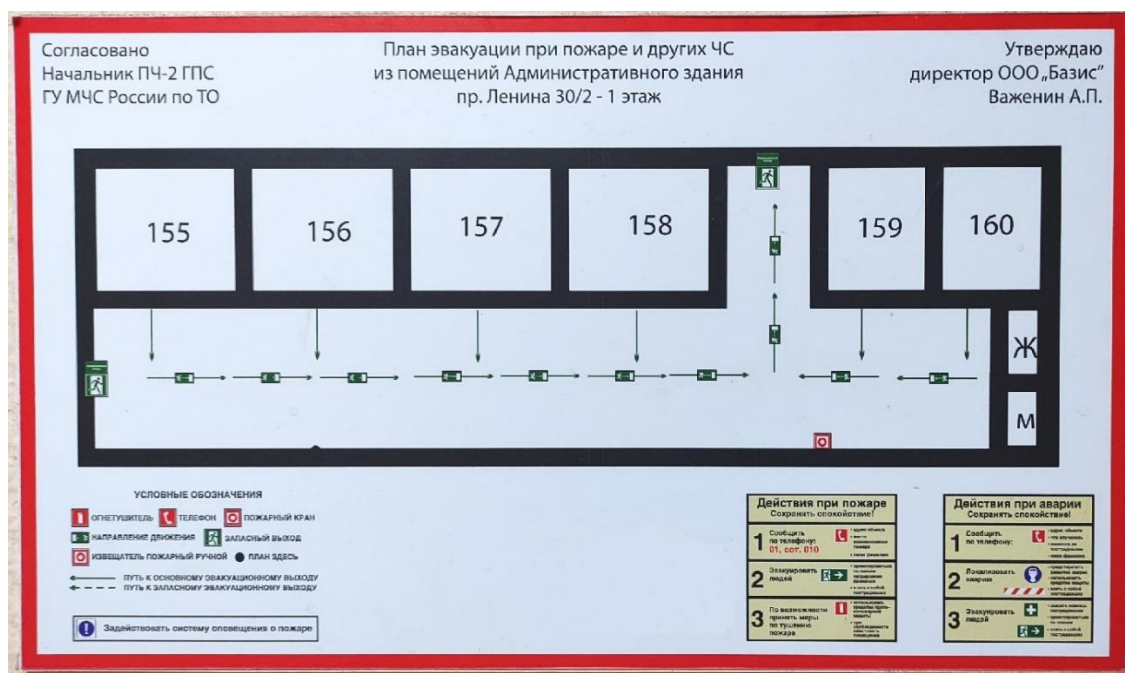


Рисунок 16 — План эвакуации при пожаре

8.8 Экологическая безопасность

В процессе деятельности человека неизбежно происходят изменения на рабочем месте, техника выходит из строя, накапливается макулатура и иные

отходы. В связи с ростом производства и развитием технологий возникла проблема рационального использования природных ресурсов и охраны окружающей среды. Чтобы обезопасить окружающую среду от большого объема выбросов следует совершенствовать технологические процессы. Для соответствия нормам экологической безопасности применяется переработка отходов.

Черновики/бумаги, содержащие сведения коммерческой или государственной тайны подлежат shreddированию, после чего прессуются, упаковываются и хранятся в объеме до 1 транспортной единицы.

Лампы, вышедшие из строя, немедленно после удаления из светильника следует упаковать в картонную упаковку или индивидуальную тару из гофрокартона, свойственную старым лампам. Если в наличии нет индивидуальной упаковки, для предотвращения механических повреждений и взаимного соприкосновения ламп, их необходимо упаковывать в бумагу или мягкий картон.

Постановлением Правительства РФ от 03.09.2010 № 681 утверждены Правила обращения с отходами производства и потребления в части электрических ламп, осветительных приборов и устройств. В Постановлении описываются нормы и правила использования и переработки отходов, так как ненадлежащие сбор, транспортирование, обезвреживание и размещение способствуют развитию загрязнения окружающей среды и причинения вреда здоровью. Также запрещается самостоятельно обезвреживать, транспортировать и размещать ртутьсодержащие лампы. Отработанные ртутные лампы разрешено размещать лишь в пунктах первичного сбора отходов.

Еще одним источником загрязнения окружающей среды, находящимся в учебном классе, являются вышедшие из строя предметы оргтехники и вычислительной техники, в том числе ПЭВМ. Непригодные для использования ПЭВМ относят к IV классу опасности, поэтому, согласно нормам, их следует подвергать специальной утилизации. Утилизация электронных приборов, печатных машин, коммуникационных приборов и МФУ проводится в несколько этапов, в результате проведения которых более 90% состава техники подлежит

повторной переработке. Утилизация включает в себя удаление опасных компонентов и крупных частей из пластика, далее проводится сортировка и измельчение пластиковых частей для вторичной переработки. После удаления пластика осуществляется измельчение оставшихся частей оргтехники и сортировка на оставшийся пластик, цветные металлы и железные части.

8.9 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайные ситуации на производстве зачастую становятся результатом природных катаклизмов. Одним из источников чрезвычайной ситуации (ЧС) являются сильные морозы в зимний период, которые свойственны региону Сибири. В силу особенностей климата для каждого региона предусматриваются различные мероприятия предосторожности и снижения опасности.

При условиях преобладания низких температур наблюдается отключение электрической энергии вследствие обрыва проводов. При сильных морозах предусмотрены следующие меры, обеспечивающие устойчивую работу учебного корпуса ВУЗа, согласно которым необходимо:

- провести мероприятия по сохранению тепла, а также обеспечить экономное расходование продовольственных запасов;
- обеспечить наличие дизельного электрогенератора для работы осветительной системы, а также наличие газового калорифера (с катализатором) в комплекте с газовым баллоном для прогрева помещения;
- для безопасной транспортировки персонала подготовить пассажирский транспорт (личный, либо служебный/корпоративный).

Также при долговременном нахождении людей в здании необходимо обеспечить наличие питьевой и технической воды на складе.

Рассмотрим также такую чрезвычайную ситуацию, как диверсия. Под диверсией понимаются действия, предполагающие разрушение или повреждение путем поджога, взрыва или иными способами предприятий и сооружений, влекущие за собой нарушения в работе организации. Чтобы

предотвратить вероятность осуществления диверсии, следует соблюдать следующие меры предосторожности:

- обеспечение круглосуточной охраны предприятия, установка турникетов, заграждений и шлагбаумов;
- поддержание постоянной связи между отделами и корпусами, наличие телефонной связи;
- отсутствие возможности рассекретить систему охраны;
- использование системы видеонаблюдения;
- внедрение и поддержание в исправном состоянии системы пропускного контроля на входе в здание;
- исправность системы сигнализации и пожарной безопасности.

8.10 Перечень нормативно-технической документации

1. СанПиН 2.2.4.548—96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
2. ГОСТ 12.1.005—88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (ССБТ).
3. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение.
4. СН 2.2.4/2.1.8.562—96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки
5. ГОСТ 12.1.003—83. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности.
6. ГОСТ 12.1.038—82. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.
7. СанПиН 1.2.3685—21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.
8. СП 12.13130.2009. Определение категорий, зданий и наружных установок по взрывоопасной и пожарной опасности
9. ГОСТ 12.1.004—91. Пожарная безопасность. Общие требования.

Список публикаций студента

1. Осипов С.П., Мирзоев Х.Д., Осипов О.С. Исследование артефактов немоноэнергетичности и рассеяния в компьютерной томографии неоднородных объектов с осевой симметрией // Инновации в неразрушающем контроле (SibTest 2019): сборник тезисов докладов V международной конференции, Екатеринбург, 26—28 июня 2019 г. — Томск, 2019. — 2019. — С. 53—54.

2. Мирзоев Х.Д., Осипов С.П., Осипов О.С. Численное моделирование и оценка артефактов в рентгеновской компьютерной томографии // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов VIII Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых, 7—12 октября 2019 г., г. Томск. — Томск, 2019. — 2019. — С. 53.

3. Осипов С.П., Мирзоев Х.Д., Чахлов С.В., Осипов О.С. Имитационная модель оценки артефактов немоноэнергетичности и рассеяния в компьютерной томографии // Дефектоскопия. — 2021. (принята к печати)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Vaughan C.L. 2008 *Imagining the Elephant, A Biography of Allan MacLeod Cormack*. London: Imperial College Press, 2005. — 324 p.
2. Wells P.N.T. Sir Godfrey Newbold Hounsfield KT CBE. 28 August 1919—12 August 2004: elected FRS 1975 // *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*. — 2005. — No. 51. — P. 221—235.
3. Samei E., Pelc N.J. *Computed Tomography: Approaches, Applications, and Operations*. — Springer Nature: Berlin/Heidelberg, Germany, 2020.
4. Du Plessis A., Boshoff W.P. A review of X-ray computed tomography of concrete and asphalt construction materials // *Construction and Building Materials*. — 2019. — V. 199. — P. 637—651.
5. Brierley N., Nye B., McGuinness J. Mapping the spatial performance variability of an X-ray computed tomography inspection // *NDT & E International*. — 2019. — V. 107. — No. article 102127.
6. Zikmund T., Šalplachta J., Zatočilová A., Břínek A., Pantělejev L., Štěpánek R., Koutný D., Paloušek D., Kaiser J. Computed tomography based procedure for reproducible porosity measurement of additive manufactured samples // *NDT & E International*. — 2019. — V. 103. — P. 111—118.
7. Du Z., Hu Y., Ali Buttar N., Mahmood A. X - ray computed tomography for quality inspection of agricultural products: A review // *Food science & nutrition*. 2019. — V. 7. — No. 10 — P. 3146—3160.
8. Naresh K., Khan K.A., Umer R., Cantwell W.J. The use of X-ray computed tomography for design and process modeling of aerospace composites: a review // *Materials & Design*. — 2020. — V. 190. — No. article 108553.
9. Duchesne M.J., Moore F., Long B.F., Labrie J. A rapid method for converting medical Computed Tomography scanner topogram attenuation scale to Hounsfield Unit scale and to obtain relative density values // *Engineering Geology*. — 2009. — V. 103. — No. 3—4. — P. 100—105.

10. Sakata D., Haga A., Kida S., Imae T., Takenaka S., Nakagawa K. Effective atomic number estimation using kV-MV dual-energy source in LINAC // *Physica Medica*. — 2017. — V. 39. — P. 9—15.
11. Hounsfield G.N. Computed medical imaging // *Medical physics*. — 1980. — T. 7. — №. 4. — C. 283-290.
12. Hsieh J. Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances. 3rd rev. ed. — SPIE Press, Bellingham. USA. 2015.
13. Villarraga-Gómez H., Thousand J.D., Smith S.T. Empirical approaches to uncertainty analysis of X-ray computed tomography measurements: a review with examples // *Precision Engineering*. — 2020. — V. 64. — P. 249—268.
14. Lüthi M., Bircher B.A., Meli F., Küng A., Thalmann R. X-ray flat-panel detector geometry correction to improve dimensional computed tomography measurements // *Measurement Science and Technology*. — 2019. — V. 31. — No. 3. — No. article 035002.
15. Körner L., Lawes S., Bate D., Newton L., Senin N., Leach R. Increasing throughput in X-ray computed tomography measurement of surface topography using sinogram interpolation // *Measurement Science and Technology*. — 2019. — V. 30. — No. 12. — No. article 125002.
16. Busi M., Mohan K.A., Dooraghi A.A., Champley K.M., Martz H.E., Olsen U.L1. Method for system-independent material characterization from spectral X-ray CT // *NDT & E International*. — 2019. — V. 107. — No. article 102136.
17. Barrett J.F., Keat N. Artifacts in CT: recognition and avoidance // *Radiographics*. — 2004. — V. 24. — № 6. — P. 1679—1691
18. Radon J. Über die bestimmung von funktionen durch ihre integralwerte längs gewisser mannigfaltigkeiten // *Classic papers in modern diagnostic radiology*. — 2005. — V. 5. — P. 261—277.
19. Cormack A.M. Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications // *Journal of applied physics*. — 1963. — V. 34. — No. 9. — P. 2722 — 2727.

20. Cormack A.M. Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications. II // Journal of Applied Physics. — 1964. — V. 35. — No. 10. — P. 2908 — 2913.
21. Hounsfield G.N. Computerized transverse axial scanning (tomography): Part 1. Description of system // The British journal of radiology. — 1973. — V. 46. — No. 552. — P. 1016—1022.
22. Macovski A., Alvarez R.E., Chan J.H., Stonestrom J.P., Zatz L.M. Energy dependent reconstruction in X-ray computerized tomography // Computers in biology and medicine. — 1976. — V. 6. — No. 4. — P. 325—336.
23. Kalender W.A., Seissler W., Klotz E., Vock P. Spiral volumetric CT with single-breath-hold technique, continuous transport, and continuous scanner rotation // Radiology. — 1990. — V. 176. — No. 1. — P. 181—183.
24. Martz H.E., Azevedo S.G., Brase J.M., Waltjen K.E., Schneberk D.J. Computed tomography systems and their industrial applications // International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part A. Applied Radiation and Isotopes. — 1990. — V. 41. — No. 10—11. — P. 943—961.
25. Izumi S., Kamata S., Satoh K., Miyai H. High energy X-ray computed tomography for industrial applications // IEEE transactions on nuclear science. — 1993. — V. 40. — No. 2. — P. 158—161.
26. Steinbock L. Tomography of nuclear fuel experiments with an electronic line scan camera // Nuclear Engineering and Design. — 1990. — V. 118. — No. 1. — P. 9—16.
27. Schlomka J., Roessl E., Dorscheid R., Dill S., Martens G., Istel T., Proksa R. Experimental feasibility of multi-energy photon-counting K-edge imaging in pre-clinical computed tomography // Physics in Medicine & Biology. — 2008. — V. 53. — No. 15. — No. article 4031.
28. McDavid W. D. et al. Correction for spectral artifacts in cross-sectional reconstruction from x rays // Medical physics. — 1977. — Vol. 4. — no. 1. — P. 54 — 57.

29. Kak A. C. Computerized tomography with X-ray, emission, and ultrasound sources // *Proceedings of the IEEE*. — 1979. — Vol. 67. — no. 9. — P. 1245—1272.
30. Kachelrieß M., Noo F. Advances and trends in image formation in x-ray CT // *Medical physics*. — 2017. — Vol. 44. — no. 9. — P. e112—e112.
31. Kwon I.H., Hong C.K., Lim J. Note: Contrast enhancement and artifact suppression in computed tomography using sinogram normalization // *Review of Scientific Instruments*. — 2018. — Vol. 89. — no. 1. — no. article 016101.
32. Mou X., Tang S., Yu H. A beam hardening correction method based on HL consistency // *Developments in X-Ray Tomography V*. — International Society for Optics and Photonics, 2006. — Vol. 6318. — no. article 63181U.
33. Hunter A.K., McDavid W.D. Characterization and correction of cupping effect artefacts in cone beam CT // *Dentomaxillofacial Radiology*. — 2012. — Vol. 41. — no. 3. — P. 217—223.
34. Lifton J.J., Malcolm A.A., McBride J.W. An experimental study on the influence of scatter and beam hardening in x-ray CT for dimensional metrology // *Measurement Science and Technology*. — 2015. — Vol. 27. — no. 1. — no. article 015007.
35. Alvarez R.E., Macovski A. Energy-selective reconstructions in x-ray computerised tomography // *Physics in Medicine & Biology*. — 1976. — Vol. 21. — no. 5. — P. 733—744.
36. Ying Z., Naidu R., Crawford C. R. Dual energy computed tomography for explosive detection // *Journal of X-ray Science and Technology*. — 2006. — Vol. 14. — no. 4. — P. 235—256.
37. Kuchenbecker S. et al. Dual energy CT: How well can pseudo-monochromatic imaging reduce metal artifacts? // *Medical physics*. — 2015. — Vol. 42. — no. 2. — P. 1023—1036.
38. Li L. et al. A tensor PRISM algorithm for multi-energy CT reconstruction and comparative studies // *Journal of X-ray science and technology*. — 2014. — Vol. 22. — no. 2. — P. 147—163.

39. Jacobsen M. C. et al. Determination of the limit of detection for iodinated contrast agents with multi-energy computed tomography // Medical Imaging 2018: Physics of Medical Imaging. — International Society for Optics and Photonics, 2018. — Vol. 10573. — no. article 105734Q.
40. Van Eeden D. Feasibility of tissue differentiation with multi-energy computed tomography: a Monte Carlo breast phantom study : Doctoral dissertation. — University of the Free State, 2017.
41. Yu L. et al. Dual-source multi-energy CT with triple or quadruple X-ray beams // Medical Imaging 2016: Physics of Medical Imaging. — International Society for Optics and Photonics, 2016. — Vol. 9783. — no. article 978312.
42. Si-Mohamed S. et al. Review of an initial experience with an experimental spectral photon-counting computed tomography system // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2017. — Vol. 873. — P. 27—35.
43. Raja A. Y. et al. Measuring Identification and Quantification Errors in Spectral CT Material Decomposition // Applied Sciences. — 2018. — Vol. 8. — no. 3. — no. article 467.
44. Holbrook M. et al. Development of a spectral photon-counting micro-CT system with a translate-rotate geometry // Medical Imaging 2018: Physics of Medical Imaging. — International Society for Optics and Photonics, 2018. — Vol. 10573. — no. paper 105731D.
45. De Man B. et al. Metal streak artifacts in X-ray computed tomography: a simulation study // Nuclear Science Symposium, 1998. Conference Record. 1998 IEEE. — IEEE, 1998. — Vol. 3. — P. 1860—1865.
46. Evseev I. et al. Computerized tomography with high-energy proton beams: Tomographic image reconstruction from computer-simulated data // Brazilian journal of physics. — 2004. — Vol. 34. — no. 3A. — P. 804—807.
47. Neves A. A. et al. Micro-CT based quantitative evaluation of caries excavation //Dental materials. — 2010. — Vol. 26. — no. 6. — P. 579—588.

48. Bidola P. et al. Applied x-ray computed tomography with high resolution in paleontology using laboratory and synchrotron sources // *Developments in X-Ray Tomography IX*. — International Society for Optics and Photonics, 2014. — Vol. 9212. — no. paper 92120X.
49. Tang S. et al. Optimization based beam-hardening correction in CT under data integral invariant constraint // *Physics in medicine and biology*. — 2018. — Vol. 63. — no. 13. — no. article 135015.
50. Завялкин Ф.М., Осипов С.П. Оценка погрешности рассеяния и немоноэнергетичности в рентгеновской компьютерной томографии // *Дефектоскопия*. — 1989. — С. 8—12.
51. Zbijewski W., Beekman F. J. Efficient Monte Carlo based scatter artifact reduction in cone-beam micro-CT // *IEEE transactions on medical imaging*. — 2006. — Vol. 25. — no. 7. — P. 817—827.
52. Sabo-Napadensky I., Amir O. Reduction of scattering artifact in multislice CT // *Medical Imaging 2005: Physics of Medical Imaging*. — International Society for Optics and Photonics, 2005. — Vol. 5745. — P. 983—992.
53. Громов А. И. и др. Проблема точности денситометрических показателей в современной многослойной компьютерной томографии // *Медицинская визуализация*. — 2016. — № 6. — С. 133—142.
54. Gong H. et al. X-ray scatter correction for multi-source interior computed tomography // *Medical physics*. — 2017. — Vol. 44. — no. 1. — P. 71—83.
55. Nikolaev D. et al. CT image quality assessment based on morphometric analysis of artifacts // *2016 International Conference on Robotics and Machine Vision*. — International Society for Optics and Photonics, 2017. — Vol. 10253. — no. article 102530B.
56. Zav'yalkin F. M., Osipov S. P. Background radiation effect on image reconstruction error in computerized tomography // *Atomnaya Ehnergiya*. — 1991. — Vol. 70. — no. 3. — P. 178—180.

57. Park H. S., Choi J. K., Seo J. K. Characterization of metal artifacts in X-ray computed tomography // *Communications on Pure and Applied Mathematics*. — 2017. — Vol. 70. — no. 11. — P. 2191—2217.
58. Yue D. et al. Reduction of metal artifacts from unilateral hip arthroplasty on dual-energy CT with metal artifact reduction software // *Acta Radiologica*. — 2018. — Vol. 59. — no. 7. — P. 853—860.
59. King K. F., Crawford C. R. Compensation of computed tomography data for X-ray detector afterglow artifacts : pat. 5265013 USA. — 1993.
60. Hsieh J., Gurmen O. E., King K. F. Investigation of a solid-state detector for advanced computed tomography // *IEEE transactions on medical imaging*. — 2000. — Vol. 19. — no. 9. — P. 930-940.
61. Zefreh K. Z. Afterglow artifacts correction for ultra-fast tomography acquisition by synchrotron radiation // *Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and Room-Temperature Semiconductor Detector Workshop (NSS/MIC/RTSD)*, 2016. — IEEE, 2016. — P. 1—4.
62. Zefreh K. Z., Welford F. M., Sijbers J. Investigation on the effect of exposure time on scintillator afterglow for ultra-fast tomography acquisition // *Journal of Instrumentation*. — 2016. — Vol. 11. — no. 12. — no. article C12014.
63. Nedavnii O. I., Osipov S. P. An estimate of the error due to apparatus "dead" time in x-ray computed tomography // *Russian journal of nondestructive testing*. — 1996. — Vol. 32. — no. 7. — P. 566—568.
64. Paulus M. J. et al. A new X-ray computed tomography system for laboratory mouse imaging // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. — 1999. — Vol. 46. — no. 3. — P. 558—564.
65. Taguchi K. et al. An analytical model of the effects of pulse pileup on the energy spectrum recorded by energy resolved photon counting x-ray detectors // *Medical physics*. — 2010. — Vol. 37. — no. 8. — P. 3957—3969.
66. Alvarez R. Near optimal neural network estimator for spectral x-ray photon counting data with pileup // *arXiv preprint arXiv:1702.01006*. — 2017.

67. Dooraghi A. A. et al. Characterization of a spectroscopic detector for application in x-ray computed tomography // *Developments in X-Ray Tomography XI*. — International Society for Optics and Photonics, 2017. — Vol. 10391. — no. article 103911G.
68. Larsson J. C. et al. High-spatial-resolution X-ray fluorescence tomography with spectrally matched nanoparticles // *Physics in medicine and biology*. — 2018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6560/aad51e>
69. Liu L. Design optimization studies for active matrix flat panel imagers based on segmented crystalline scintillators for radiotherapy imaging: Doctoral dissertation.: University of Michigan, 2015.
70. Donath T. Quantitative X-ray microtomography with synchrotron radiation, GKSS- Forschungszentrum Bibliothek, Geesthacht, 2007.
71. Wang W. et al. Spatial resolution and noise prediction in flat-panel cone-beam CT penalized-likelihood reconstruction // *Medical Imaging 2018: Physics of Medical Imaging*. — International Society for Optics and Photonics, 2018. — Vol. 10573. — no. article 1057346.
72. Melnyk R. Theoretical and experimental evaluation of spatial resolution in a variable resolution x-ray computed tomography scanner: Doctoral dissertation.: University of Tennessee Health Science Center, 2007.
73. Xu Y. et al. A practical cone-beam CT scatter correction method with optimized Monte Carlo simulations for image-guided radiation therapy // *Physics in Medicine & Biology*. — 2015. — V. 60. — №. 9. — C. 3567.
74. Busi M. et al. A Monte Carlo simulation of scattering reduction in spectral x-ray computed tomography // *Advances in Computational Methods for X-Ray Optics IV*. — International Society for Optics and Photonics, 2017. — Vol. 10388. — no. article 103880P.
75. Busi M. et al. Simulation tools for scattering corrections in spectrally resolved x-ray computed tomography using McXtrace // *Optical Engineering*. — 2018. — vol. 57. — no. 3. — no. article 037105.

76. Thomsen M. et al. Prediction of beam hardening artefacts in computed tomography using Monte Carlo simulations // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. — 2015. — Vol. 342. — P. 314—320.

77. Cunsolo S. et al. Monte Carlo determination of radiative properties of metal foams: Comparison between idealized and real cell structures // International Journal of Thermal Sciences. — 2015. — Vol. 87. — P. 94-102.

78. Рентгеновский микротомограф "Орел-МТ" —
URL: https://portal.tpu.ru/departments/laboratory/rknl/products/orel_tomo

79. Udod V.A., Osipov S.P., Wang Y. The mathematical model of image, generated by scanning digital radiography system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing, 2017. — Vol. 168. — No. 1. — No. article 012042.

80. Осипов С.П., Чахлов С.В., Кайралапов Д.У., Сиротьян Е.В. Численное моделирование радиографических изображений — основа корректного проектирования систем цифровой радиографии крупногабаритных объектов // Дефектоскопия. — 2019. — № 2. — С. 43—55.

81. Осипов С.П., Усачёв Е.Ю., Чахлов С. В., Щетинкин С.А., Манушкин А.А., Осипов О.С., Сергеева Н.А. Математическая модель цифровой линейной томографии // Дефектоскопия. — 2019. — № 5. — С. 46—56.

82. Осипов С.П., Ядренкин И.Г., Чахлов С.В., Осипов О.С., Усачев Е.Ю. Имитационное моделирование в цифровой радиографии с учетом пространственных форм объектов контроля // Дефектоскопия. — 2020. — № 8. — С. 35—48.

83. Осипов С.П., Ядренкин И.Г., Чахлов С.В., Осипов О.С., Усачёв Е.Ю., Манушкин А.А. Вычислительная модель рентгеновской компьютерной томографии с функцией оценки плотности // Дефектоскопия. — 2021. — № 3 — С. 37—52.

84. Осипов С.П., Мирзоев Х.Д., Осипов О.С. Исследование артефактов немонотонности и рассеяния в компьютерной томографии неоднородных

объектов с осевой симметрией // Инновации в неразрушающем контроле (SibTest 2019): сборник тезисов докладов V международной конференции, Екатеринбург, 26—28 июня 2019 г. — Томск, 2019. — 2019. — С. 53—54.

85. Мирзоев Х.Д., Осипов С.П., Осипов О.С. Численное моделирование и оценка артефактов в рентгеновской компьютерной томографии // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов VIII Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых, 7—12 октября 2019 г., г. Томск. — Томск, 2019. — 2019. — С. 53.

86. Shamsabadi R., Baghani H.R., Mowlavi A.A., Azadegan B. Effective energy assessment during breast cancer intraoperative radiotherapy by low-energy X-rays: A Monte Carlo study // Radiation and Environmental Biophysics. — 2021. — V. 60. — No. 1. — P. 125—134.

87. Dvoryankin V.F., Dikaev Y.M., Kudryashov A.A., Sokolovskii A.A. Determining the instantaneous effective energy of x-ray tube bremsstrahlung // Measurement Techniques. — 2003. — V. 46. — No. 8. — P. 806—809.

88. Petrushansky M.G. Improved calculation method for determining effective energy of X-Ray radiation and its experimental verification // Biomedical Engineering. — 2015. — V. 48. — No. 5. — P. 249—252.

89. Osipov S.P., Zhang G.L., Chakhlov S.V., Shtein M.M., Shtein A.M., Trinh V.B., Sirotan E. Estimation of parameters of digital radiography systems // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 2018. — V. 65. — No. 10. — P. 2732—2742.

90. Kramers H.A. XCIII. On the theory of X-ray absorption and of the continuous X-ray spectrum // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. — 1923. — V. 46. — No. 275. — P. 836—871.

91. Бессонов В.Б., Баранов И.М., Потрахов Е.Н., Жамова К.К., Грязнов А.Ю. Программа для моделирования спектров излучения рентгеновских трубок // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. — 2012. — № 3. — С. 8—12.

92. Сидуленко О.А., Касьянов В.А., Осипов С.П., Касьянов С.В. Щелевые и пинхольные коллиматоры в цифровой рентгенографии // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2007. — № 3. — С. 62—64.

93. Сидуленко О.А., Касьянов В.А., Касьянов С.В., Осипов С.П. Оценка эффективности щелевой коллимации высокоэнергетического источника излучения при радиометрическом контроле крупногабаритных объектов // Дефектоскопия. — 2006. — № 2. — С. 40—45.

94. Бенецкий Б.А., Плотникова М.В. Факторы накопления гамма-излучения для композиционных материалов и защит // Краткие сообщения по физике Физического института им. ПН Лебедева Российской Академии Наук. — 2012. — № 4. — С. 29—36.

95. Гусев Н.Г., Климанов В.А., Машкович В.П., Суворов А.П. Защита от ионизирующих излучений: В 2 т. Т. 1. Физические основы защиты от излучений: Учебник для вузов // М.: Энергоатомиздат, 1989.

96. Brooks R.A., Di Chiro G. Theory of image reconstruction in computed tomography // Radiology. — 1975. — Vol. 117. — No. 3. — С. 561—572.

97. Zhang T., Xing Y., Zhang L., Jin X., Gao H., Chen Z. Stationary computed tomography with source and detector in linear symmetric geometry: Direct filtered backprojection reconstruction // Medical physics. — 2020. — Vol. 47. — No. 5. — P. 2222—2236.

98. Miqueles E., Koshev N., Helou E.S. A backprojection slice theorem for tomographic reconstruction // IEEE Transactions on Image Processing. — 2017. — Vol. 27. — No. 2. — P. 894—906.

99. Кудрявцев К.Я. Повышение качества восстановления изображения при обратном преобразовании Радона // Научная визуализация. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 14—27.

100. Осипов С.П., Прищепа И.А., Чахлов С.В., Осипов О.С., Усачёв Е.Ю. Алгоритмы моделирования и обработки информации в рентгеновской томографии пеноматериалов // Дефектоскопия. — 2021. — № 3 — С. 53—65.

101. Доля П.Г. Аналитические методы компьютерной томографии, URL: http://geometry.karazin.ua/resources/documents/20150715155132_e76e359e30e3b.pdf
102. Schofield R., King L., Tayal U., Castellano I., Stirrup J., Pontana F., Nicol E. Image reconstruction: Part 1—understanding filtered back projection, noise and image acquisition // *Journal of cardiovascular computed tomography*. — 2020. — Vol. 14. — No. 3. — P. 219—225.
103. Susanto A. T., Prajitno P., Kurnianto K. Development of low-cost industrial x-ray computed tomography system based on digital fluoroscopy // *Journal of Physics: Conference Series*. — IOP Publishing, 2021. — Vol. 1825. — No. 1. — No. article 012033.
104. Dolmatova A., Chukalina M., Nikolaev D. Accelerated FBP for computed tomography image reconstruction // *2020 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. — IEEE, 2020. — P. 3030—3034.
105. Shepp L.A., Logan B.F. The Fourier reconstruction of a head section // *IEEE Transactions on nuclear science*. — 1974. — V. 21. — No. 3. — P. 21—43.
106. Osipov S. et al. Theoretical study of a simplified implementation model of a dual-energy technique for computed tomography // *NDT & E International*. — 2018. — Vol. 98. — P. 63—69.
107. Nakano T., Nakashima Y. Analytical expressions for the reconstructed image of a homogeneous cylindrical sample exhibiting a beam hardening artifact in X-ray computed tomography // *Journal of X-ray science and technology*. — 2018.
108. Ametova E. et al. A computationally inexpensive model for estimating dimensional measurement uncertainty due to x-ray computed tomography instrument misalignments // *Measurement Science and Technology*. — 2018. — Vol. 29. — no. 6. — no. article 065007.
109. De Micheli E. A fast algorithm for the inversion of Abel's transform // *Applied Mathematics and Computation*. — 2017. — Vol. 301. — P. 12—24.
110. Dooraghi A.A., Fix B.J., Smith J.A., Brown W.D., Azevedo S.G., Martz H.E. Characterization of a spectroscopic detector for application in x-ray computed

tomography // Developments in X-Ray Tomography XI. — International Society for Optics and Photonics, 2017. — V. 10391. — No. article 103911G.

111. Gholami M., Rashedi A., Lenoir N., Hautemayou D., Ovarlez G., Hormozi S. Time-resolved 2D concentration maps in flowing suspensions using X-ray // Journal of Rheology. — 2018. — Vol. 62. — No. 4. — P. 955—974.

112. Sarantites D.G., Sobotka L.G. Computational templates for introductory nuclear science using Mathcad // American Journal of Physics. — 2013. — V. 81. — No. 1. — P. 44—49.

113. Elemental Data Index. URL: www.nist.gov/pml/elemental-data-index

114. Tothill P. The ratio of K characteristic to total radiation emitted from a tungsten target X-ray tube // Journal of Physics D: Applied Physics. — 1968. — T. 1. — No. 9. — P. 1093—1107.

115. Poludniowski G.G. Calculation of x-ray spectra emerging from an x-ray tube. Part II. X-ray production and filtration in x-ray targets // Medical physics. — 2007. — V. 34. — No. 6 Part1. — P. 2175—2186.

116. Harima Y. An approximation of gamma-ray buildup factors by modified geometrical progression // Nuclear Science and Engineering. — 1983. — V. 83. — No. 2. — P. 299—309.

117. Peterzol A., Létang J.M., Babot D. A beam stop based correction procedure for high spatial frequency scatter in industrial cone-beam X-ray CT // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. — 2008. — V. 266. — No. 18. — P. 4042—4054.

ПРИЛОЖЕНИЕ А


(справочное)

Literature review, selection of the goal of research and problem statement

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ92	Мирзоев Хусниддин Джамоулудинович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник РКНЛ РКД	Осипов С.П.	к.т.н.		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ	Федорина З.В.	к.п.н.		
Преподаватель ОИЯ	Цепилова А. В.	к.п.н.		

1 Literature review, selection of the goal of dissertation research and problem statement

1.1 Literature review

1.1.1 X-ray computed tomography: historical milestones and names

1917: Johann Radon, inversion of projections theorem (forward and reverse Radon transformation). It is not uncommon for the history of science that theory often significantly outstrips the practical implementation of an idea, and theoretical research is sometimes repeated far from its primary form. The RCT is no exception. In 1917, the great Austrian mathematician Johann Radon introduced the integral transformation [18], which was later named after him. The advantage of this transform is that it can be reversed. The paper [18] is written in a classical mathematical form — without illustrations or simple examples, which may be why Radon transformations were rediscovered many decades later, and in a slightly different form. Let us briefly explain the idea of Radon for a plane. Let there be a certain domain $\mathbf{S} \subset \mathbb{R}^2$, and on \mathbf{S} a certain function f is defined that is not equal to zero, at least on a part of the set \mathbf{S} . Consider the set of all integrals \mathbf{P} of the function f over all rays (straight lines) intersecting the domain \mathbf{S} . Let us represent the aggregate \mathbf{P} as a union

$$\mathbf{P} = \bigcup_{\theta \in [0, 2\pi]} \mathbf{P}_\theta, \quad (1)$$

where the entry \mathbf{P}_θ indicates the set of integrals of the function f over parallel rays corresponding to the angle θ (see figure 1).

Figure 1 shows a diagram explaining Radon's theorem on ray integrals (projections). We introduce two Cartesian coordinate systems: fixed — XOY ; mobile — $X'OY'$. The point O belongs to \mathbf{S} . A two-dimensional domain \mathbf{S} is a bounded set, so it can be inscribed in a circle $\mathbf{R} \subset \mathbb{R}^2$ of radius R . In Figure 1, the red line marks the ray $\mathbf{L}(\theta, x')$ passing through the point x' at an angle θ . When forming the \mathbf{P}_θ — set of integrals of the function f along parallel rays corresponding to the angle θ , the ray moves in the perpendicular direction indicated by the red dotted arrow in Figure 1.

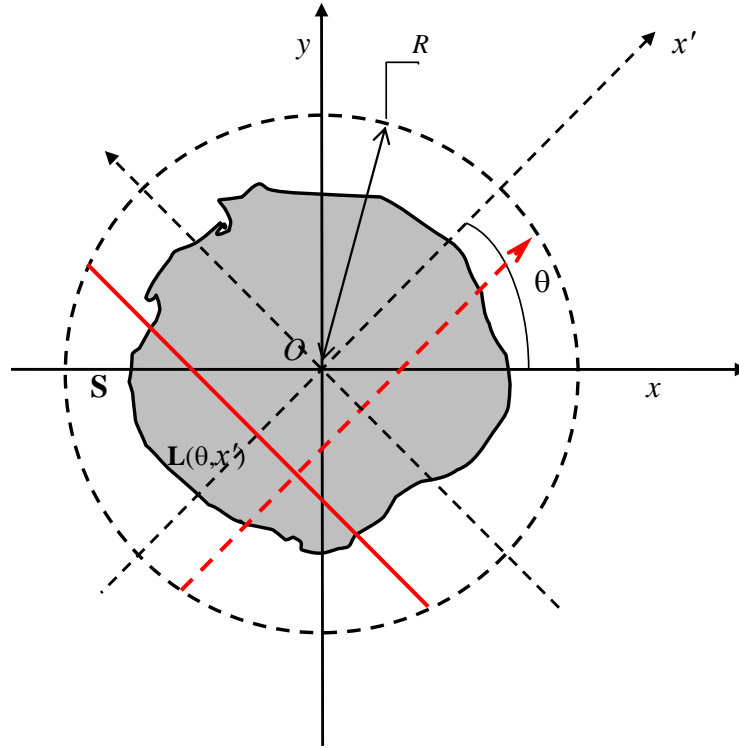


Figure 1. A diagram explaining Radon's theorem on ray integrals (projections)

The mutual relation of the XOY and $X'OY$ coordinate systems' is described by the rotation transformation

$$\begin{cases} x' = x \cos \theta + y \sin \theta \\ y' = -x \sin \theta + y \cos \theta \end{cases}, \begin{cases} x = x' \cos \theta - y' \sin \theta \\ y = x' \sin \theta + y' \cos \theta \end{cases}. \quad (2)$$

The function f is redefined for the entire circle \mathbf{R} as follows

$$\hat{f}(x, y) = \begin{cases} f(x, y), & (x, y) \in \mathbf{S} \\ 0, & (x, y) \in \mathbf{R} \setminus \mathbf{S} \end{cases}. \quad (3)$$

From a formalized point of view, the expression for evaluating the set of integrals over parallel rays \mathbf{P}_θ , $0 \leq \theta \leq 2\pi$, has the form

$$\mathbf{P}_\theta = \left\{ \int_{L(\theta, x')} \hat{f}(x', y') dy' \mid -R \leq x' \leq R \right\}. \quad (4)$$

Radon proved a theorem on reconstruction of the function $f(x, y)$ with respect to the complete set of integrals \mathbf{P} . In the future, the marked set \mathbf{P} became known as a sinogram, and the aggregates of \mathbf{P}_θ as projections.

It should be noted that the significance of Johann Radon's contributions to mathematics was reflected in the assignment of his name in 2003 by the Austrian

Academy of Sciences to the newly discovered U Institute of Computational and Applied Mathematics.

1963-1964: Allan Cormack — theoretical justification of the RCT method. In his two main works [19, 20], Cormack provided a theoretical justification for X-ray computed tomography. The f linear attenuation coefficient (LCO) of gamma radiation was considered as a function of f . The algorithm for reconstructing cross-section images used forward and inverse Fourier transforms. The above works did not immediately attract the attention of the scientific community, this was due to the imperfection of equipment and technologies related to digital radiometric control.

1969—1971: Godfrey Hounsfield – development of the first RCT system. Hounsfield, an electrical engineer, was the first to put ideas into practice [21], having developed an EMR scanner, which became the first computer X-ray tomograph. This scanner was designed for head scanning only. The scientific community and the authorities highly appreciated the work of the inventor. The scale for measuring the density of the medium under study for X-rays in RCT was named after Hounsfield.

The RCT method provided an opportunity to study the internal structure of the research object. Cormack and Hounsfield became laureates of the 1979 Nobel Prize in Physiology or Medicine "for the development of computed tomography". In the decision of the Nobel Committee, it was noted: "When the method was introduced into medical practice six years ago, it quickly became apparent that it meant something revolutionary new, with big implications for X-ray diagnostics and the medical disciplines that use it." This phrase can be supplemented by the fact that the appearance of the RCT method marked a revolution not only in medicine, but also in all branches of science and technology. Computed tomography is used wherever information is needed about the internal structure of the OK, that is, about the distribution over the volume of some informative parameter that is of interest to consumers.

1979-1981: Albert Makowski, Robert Alvarez — development of the theoretical foundations of the dual energy method (MDE). The difference between the energy spectra of X-ray radiation and the δX -functions in RCT caused

the appearance of distortions (artifacts) in the reconstructed images, since when the thickness of the attenuating object increases, the X-ray radiation "hardens" (the artifact is not mono-energy). There are many approaches to reduce the impact of this artifact on the quality of reconstruction. One of these approaches led to the appearance of the dual energy method [22], which, in addition to reducing the influence of the non-monoenergetic artifact on the quality of RCT studies, led to an increase in the informative value of RCT. Combining RCT with MDE makes it possible to simultaneously estimate the spatial distribution over the volume of the OK not only of the density, but also of the effective atomic number.

1990—1991: Willie Kalender, PeterVoc — improvement of spiral CT methods and systems. One of the most significant problems of RCT is related to the performance of the method. The development of spiral CT methods and systems has led to an increase in the performance of computed tomography, which is especially important to extended objects.

1990—1994: Martz Harry, Azevedo Stefan, Izumi Shigeru, Kamata Shouji, Steinbock Lothar, Eduard Vainberg, Felix Zavyalkin - QD systems based on linear accelerators and betatrons. Initially, the RCT method was developed in medicine as a way to visualize the internal structure of patients, but it has also become widely used in science, industry, and screening control. X-ray devices with a maximum energy of 50 keV and up to 450 keV (modern ones up to 800 keV) were not enough to control large-sized products in the oil and gas industry, nuclear industry and mechanical engineering. Linear accelerators and betatrons have been used as a source of high — energy X-ray (bremsstrahlung) radiation to increase the penetrating power [24—26].

2008: Jens Szlomka, Ewald Roessl, Christoph Herrmann, Roland Proxa — development of theoretical foundations of multi-energy R&D. The most effective approach to improving the information content of X-ray computed tomography is the use of its multi-energy implementation [27]. The multi-energy implementation of RCT makes it possible not only to more accurately estimate the density and effective atomic number distributions over the cross-section (volume) of

the control object, but also to increase the probability of detecting chemical elements, as well as to increase the accuracy of concentration measurement, etc.

1.1.2 Artefacts in X-ray computed tomography: a brief review of literature

The entire history of the development of X-ray computed tomography in its various implementations from internal structure visualization tools to measuring instruments for various parameters of the object (density, porosity, concentration) is associated with the study of artefacts [12, 28—31] due to physical and technical reasons (factors) and improvement of technical and algorithmic means of reducing the levels of these artifacts to values (levels) acceptable to end users [32—34]. Artefacts are defined as distortions in the final images of cross-sections obtained by the X-ray CT method, i.e. deviations of the estimates of the function $f^*(x,y)$ from the function $f(x,y)$ given on the set \mathbf{S} (see Figure 1 above and explanation of Radon transformations). The study of artefacts is of interest not only in the classical implementation of X-ray CT but also in tomography implementations supplemented by the dual energy method [35—37], by the multi-energy method (MEM) [38—41] and spectral tomography [42—44]. A number of factors have significant influence on the bias of estimates of the linear attenuation coefficient (LAC) distributions of X-ray radiation (the first stage of X-ray CT development — the classical implementation of X-ray CT), density distributions ρ and effective atomic number Z (realizations of X-ray CT based on MDE or MME, spectral implementation of X-ray CT) on the volume of the object of control (OC). Among the physical factors there non-mono-energy source of the X-ray sky radiation (Bremsstrahlung) [45—50]; a significant contribution of the radiation scattered in OC into the integral pot of OC registered radiation [50—54]; the presence of background radiation [55, 56]; opacity of OC parts for radiation – metal artifact [12, 17, 55, 57, 58]; afterglow of scintillators [59—62]; dead time radiometric detectors [63—68] registering radiation in the counting spectrometric modes; the broadening of the point spread function (PSF) [69—71] in the radiation-optical converters (ROC), radiation due to scattering, optical radiation and the influence of channels on top of each other. Special attention is paid to

physical factors in the study of artifacts in X-ray CT because they exist as a given (objective reality) and do not depend on the quality of technical solutions. This means that even for a "perfect" system of CT artefacts caused by the physics of the interaction of x-rays with matter (emission, "the actual interaction" and registration) exist to reduce their impact on the quality of the final image of the ad hoc technical, methodological and algorithmic techniques, which usually complicate the diagram of the system of X-ray CT and (or) the functioning of the system. Technical reasons for artefacts in X-ray CT include any deviation of the parameters of large components (components) of the corresponding systems from ideal (model) ones, for example, inaccurate positioning of channels in the X-ray detector, changing the angle step when the object rotates relative to the X-ray source + X-ray detector complex, etc.

Figure 2 shows a graph of the distribution of scientific publications by year for the keywords: artefacts; CT; X-ray. The graph is generated on basis of a search using the SCOPUS database and corresponding tools.

The graph shown in Figure 2 shows the persistence of interest in research related to artefacts in the X-ray CT.

Among the entire set of physical artefacts of X-ray CT a special place is occupied by artifacts of non-monoenergetics (equivalently, an artifact of polychromaticity, and artifact of X-ray (bremsstrahlung) beam hardening) and scattering. The reason for the importance of the first artifact is the nature of X-ray (bremsstrahlung) radiation, in which the energy spectrum is significantly far from the energy spectrum of monoenergetic radiation (δ -function). The significance of the second artefact is related to the natural desire of consumers to receive from manufacturers X-ray CT systems with the highest possible performance. The performance of X-ray CT systems also depends on the type of detector X-ray. X-ray CT systems with panel detector X-ray have significantly better performance compared to line detector X-ray. The price paid for these CT systems with X-ray source with a sufficiently high maximum energy is the increase of the influence of the scattering effect on the reconstruction quality. Analysis of the distribution of the number of scientific publications from the SCOPUS database by year with the

keywords: artefacts; X-ray; beam hardening; (computed tomography or CT) showed a relentless interest in research on the non-monoenergetic artifact, with 30 to 40 papers published per year. The researchers' interest in the scattering artifact is similar.

Below we will consider approaches to the study of artifacts and methods of their reduction in X-ray CT.

1.1.3 Methods of studying artefacts in X-ray computed tomography

At the initial stage of development of X-ray computed tomography methods, artefacts were mainly studied by the field experiment method. This approach is associated with significant time and material costs, since specially made phantoms are needed. Variations of the X-ray CT component systems in the course of experimental research are unnecessarily expensive, even for large scientific organizations and collaborations. A particular difficulty of applying an experimental approach to the study of a particular physical artifact in X-ray CT is associated with the difficulty of isolating the influence of the corresponding processes. This fact leads to the need for highly qualified specialists: mathematicians; materials scientists; physicists; electronics engineers; mechanical engineers; interpreters of the results of physical experiments.

The cost of field experiments in relation to the studies described above has led to complete or partial replacement of real experiments with virtual ones (synonyms — computational, numerical, computer, simulation). Of course, it is impossible to completely exclude a full-scale experiment; it is necessary to test mathematical (simulation, numerical) models that form the basis of virtual X-ray CT systems. Virtual CT systems should be based on deep understanding of the physical laws of information formation and processing in relation to tomography.

We emphasize that at the present stage of development of X-ray computed tomography methods, the prevailing approach to solving the above problems that are relevant at the design stage of X-ray CT is the approach of [40, 72—77], based on mathematical and simulation models of the corresponding systems with additional blocks accounting for physical and technical artefacts. Of course, the models mentioned above should be implemented in the form of computer programs.

1.2 Objects of control

It is absolutely impossible to study the influence of physical artefacts not for a specific object or class of test objects, but for all objects. Most effectively, many types of artefacts are evaluated for cylindrical objects that are homogeneous in material [50, 56, 63]. Such OC belong to a broader class of objects — the class of objects with axial symmetry with possible variations in radial distributions in terms of density ρ and / or effective atomic number Z .

There are a number of critical control objects that can be attributed to the class of objects with axial symmetry mentioned above. Here, responsible products are understood as technical products, the failure of which during operation can lead to the termination or disruption of the functioning of sophisticated complexes and systems. The consequences of failures are violations of environmental, industrial, chemical, and radiation safety, and the elimination of violations is associated with significant time and material costs. The objects mentioned above can have a homogeneous or relatively inhomogeneous structure. Examples of such OC are, for example, ball and ring fuel elements, coaxial cables, steel pipes in shells, cylindrical accumulators of significant energy intensity.

1.3 The goal and objectives of the dissertation

The scientific literature does not fully address issues related to the feasibility of X-ray CT system design tasks. X-ray CT scans allows to control objects from the above class and take into account the main artefacts, as well as technical impacts to reduce them. It has been stated above that the most significant artefacts are those of non-mono-energy and scattering.

To assess the possibility of solving the problem of designing systems for monitoring objects with axial symmetry, it is necessary to develop a generalized mathematical model for evaluating artifacts in X-ray CT scan and implement it as a program in the MathCad system, which will be a virtual X-ray computed tomography system (a digital simulator of the X-ray CT system). The digital X-ray CT simulator allows performing computational experiments to estimate non-monoenergetic and

scattering artefacts for the considered OC. For experimental verification of the estimates of the studied artefacts obtained by the computational experiment method, the results available in the scientific literature, as well as the results of experiments on the Orel microtomograph belonging to the National Research TPU can be used.

Therefore, the **main goal of the final qualification work** is to develop a mathematical model, algorithm, and a program the MathCad system for simulating non-monoenergetic and scattering artefacts in computed tomography of inhomogeneous objects with axial symmetry and conduct a number of illustrative and comparative computational and field experiments.

To achieve the above goal, you need to solve **a number of the following tasks:**

1. For a radiation source with an arbitrary energy spectrum, adapt the mathematical model and an algorithm for generating sinograms in relation to objects with axial symmetry and implement them in the MathCad program.

2. Modify the developed model (program) with a block describing the spectrum of X-ray and gamma radiation, taking into account the characteristic radiation and preliminary filtering.

3. Improve the modified model (program) with a block for estimating the scattering contribution to the integral flux of the detected radiation.

4. Adapt the algorithm for reconstruction of cross-section images in relation to the problem under consideration.

5. Compare the results of computational and field experiments in order to assess the quality of functioning of the algorithm for simulation of non-monoenergetic artifacts scattering of cylindrical inhomogeneous objects with axial symmetry.

2 Adaptation of the mathematical model of synogram formation to objects with axial symmetry

In recent years, a significant number of articles have been published [78—83] on various aspects of mathematical and numerical modeling of images in digital radiography and projections in X—ray computed tomography. As a basis for adaptation, we will use mathematical models from [82, 83], taking into account the

type of control objects and general approaches [84, 85]. The main part of the dissertation research is given in the paper.

The mathematical model for forming sinograms (a set of projections) consists of several blocks. We will describe them sequentially.

2.1 A scheme of projection formation in X-ray computed tomography in the geometry of a parallel radiation beam

The geometry of the parallel radiation beam in relation to the evaluation of the studied artifacts was chosen intentionally. This geometry allows you to estimate artifacts most accurately, since for it (the geometry) there are no distortions caused by the fan (taper) nature of the image beam.

When describing the concept of "artifact in X-ray CT" above, it is emphasized that distortions are determined relative to some idealized system of forming "ideal" sinograms. The "ideal" sinogram is formed in the geometry of a point-like unidirectional beam of monoenergetic gamma radiation. In this case the energy spectrum of the radiation source $g(E)$ is described by the expression

$$g(E) = \delta(E - E_0), \delta(E - E_0) = \begin{cases} \infty, E = E_0 \\ 0, E \neq E_0 \end{cases}, \int_0^{\infty} \delta(E) dE = 1, \quad (5)$$

here δ is the generalized Dirac function; E_0 is the energy of gamma radiation.

REFERENCES

12. Hsieh J. Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances. 3rd rev. ed. — SPIE Press, Bellingham. USA. 2015.
13. Villarraga-Gómez H., Thousand J.D., Smith S.T. Empirical approaches to uncertainty analysis of X-ray computed tomography measurements: a review with examples // Precision Engineering. — 2020. — V. 64. — P. 249—268.
14. Lüthi M., Bircher B.A., Meli F., Küng A., Thalmann R. X-ray flat-panel detector geometry correction to improve dimensional computed tomography measurements // Measurement Science and Technology. — 2019. — V. 31. — No. 3. — No. article 035002.

15. Körner L., Lawes S., Bate D., Newton L., Senin N., Leach R. Increasing throughput in X-ray computed tomography measurement of surface topography using sinogram interpolation // Measurement Science and Technology. — 2019. — V. 30. — No. 12. — No. article 125002.
16. Busi M., Mohan K.A., Dooraghi A.A., Champley K.M., Martz H.E., Olsen U.L. Method for system-independent material characterization from spectral X-ray CT // NDT & E International. — 2019. — V. 107. — No. article 102136.
17. Barrett J.F., Keat N. Artifacts in CT: recognition and avoidance // Radiographics. — 2004. — V. 24. — № 6. — P. 1679—1691
18. Radon J. Über die bestimmung von funktionen durch ihre integralwerte längs gewisser mannigfaltigkeiten // Classic papers in modern diagnostic radiology. — 2005. — V. 5. — P. 261—277.
19. Cormack A.M. Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications // Journal of applied physics. — 1963. — V. 34. — No. 9. — P. 2722 — 2727.
20. Cormack A.M. Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications. II // Journal of Applied Physics. — 1964. — V. 35. — No. 10. — P. 2908 — 2913.
21. Hounsfield G.N. Computerized transverse axial scanning (tomography): Part 1. Description of system // The British journal of radiology. — 1973. — V. 46. — No. 552. — P. 1016—1022.
22. Macovski A., Alvarez R.E., Chan J.H., Stonestrom J.P., Zatz L.M. Energy dependent reconstruction in X-ray computerized tomography // Computers in biology and medicine. — 1976. — V. 6. — No. 4. — P. 325—336.
23. Kalender W.A., Seissler W., Klotz E., Vock P. Spiral volumetric CT with single-breath-hold technique, continuous transport, and continuous scanner rotation // Radiology. — 1990. — V. 176. — No. 1. — P. 181—183.
24. Martz H.E., Azevedo S.G., Brase J.M., Waltjen K.E., Schneberk D.J. Computed tomography systems and their industrial applications // International

Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part A. Applied Radiation and Isotopes. — 1990. — V. 41. — No. 10—11. — P. 943—961.

25. Izumi S., Kamata S., Satoh K., Miyai H. High energy X-ray computed tomography for industrial applications // IEEE transactions on nuclear science. — 1993. — V. 40. — No. 2. — P. 158—161.

26. Steinbock L. Tomography of nuclear fuel experiments with an electronic line scan camera // Nuclear Engineering and Design. — 1990. — V. 118. — No. 1. — P. 9—16.

27. Schlomka J., Roessl E., Dorscheid R., Dill S., Martens G., Istel T., Proksa R. Experimental feasibility of multi-energy photon-counting K-edge imaging in pre-clinical computed tomography // Physics in Medicine & Biology. — 2008. — V. 53. — No. 15. — No. article 4031.

28. McDavid W. D. et al. Correction for spectral artifacts in cross-sectional reconstruction from x rays // Medical physics. — 1977. — Vol. 4. — no. 1. — P. 54—57.

29. Kak A. C. Computerized tomography with X-ray, emission, and ultrasound sources // Proceedings of the IEEE. — 1979. — Vol. 67. — no. 9. — P. 1245—1272.

30. Kachelrieß M., Noo F. Advances and trends in image formation in x-ray CT // Medical physics. — 2017. — Vol. 44. — no. 9. — P. e112—e112.

31. Kwon I.H., Hong C.K., Lim J. Note: Contrast enhancement and artifact suppression in computed tomography using sinogram normalization // Review of Scientific Instruments. — 2018. — Vol. 89. — no. 1. — no. article 016101.

32. Mou X., Tang S., Yu H. A beam hardening correction method based on HL consistency // Developments in X-Ray Tomography V. — International Society for Optics and Photonics, 2006. — Vol. 6318. — no. article 63181U.

33. Hunter A.K., McDavid W.D. Characterization and correction of cupping effect artefacts in cone beam CT // Dentomaxillofacial Radiology. — 2012. — Vol. 41. — no. 3. — P. 217—223.

34. Lifton J.J., Malcolm A.A., McBride J.W. An experimental study on the influence of scatter and beam hardening in x-ray CT for dimensional metrology // Measurement Science and Technology. — 2015. — Vol. 27. — no. 1. — no. article 015007.
35. Alvarez R.E., Macovski A. Energy-selective reconstructions in x-ray computerised tomography // Physics in Medicine & Biology. — 1976. — Vol. 21. — no. 5. — P. 733—744.
36. Ying Z., Naidu R., Crawford C. R. Dual energy computed tomography for explosive detection // Journal of X-ray Science and Technology. — 2006. — Vol. 14. — no. 4. — P. 235—256.
37. Kuchenbecker S. et al. Dual energy CT: How well can pseudo-monochromatic imaging reduce metal artifacts? // Medical physics. — 2015. — Vol. 42. — no. 2. — P. 1023—1036.
86. Osipov S.P., Mirzoev Kh.D., Chakhlov S.V., Osipov O.S. A simulation model for evaluating non-monoenergetic and scattering artifacts in computed tomography // Defektoskopiya. — 2021 (Accepted for publication)